

**DISEÑO DE MEZCLA PARA MORTEROS DE CENIZA VOLANTE ACTIVADOS  
ALCALINAMENTE.**

**ANDRES ALFONSO OSORIO ROSADO**

**UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL**

**BOGOTA**

**2020**

---

**DISEÑO DE MEZCLA PARA MORTEROS DE CENIZA VOLANTE ACTIVADOS  
ALCALINAMENTE.**

**ANDRES ALFONSO OSORIO ROSADO**

**Trabajo de grado para optar al título de  
Ingeniero Civil**

**Director**  
**CARLOS GREGORIO PASTRÁN BELTRÁN**  
**Ingeniero civil**

**UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL**  
**BOGOTÁ**  
**2020**

---



Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:

**Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5)**

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

**Bajo las condiciones siguientes:**



**Atribución** — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



**No Comercial** — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



**Sin Obras Derivadas** — No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.

**Nota de aceptación:**

---

---

---

---

---

**Presidente del Jurado**

---

**Jurado**

---

**Jurado**

**Bogotá D.C 3 de Diciembre de 2020**

A mis padres, Cesar Augusto y Martha, por su abnegado sacrificio y lucha constante para  
que hoy yo pueda ascender un peldaño más en mi proyecto de vida.

A mis hermanos José Emilio, Carlos Augusto y César Armando por su incondicional apoyo  
a lo largo de mis estudios y sus palabras de apoyo siempre precisas en el momento justo.

## **RESUMEN**

El presente trabajo de investigación se enfoca en el análisis de diferentes diseños de mezcla para morteros de ceniza volante activada alcalinamente, con los cuales se busca identificar los parámetros de diseño más relevantes, unirlos en un solo diseño teórico y finalmente demostrar, desde la teoría, la posibilidad de considerarlo como una opción viable de reemplazo a las mezclas de mortero convencional a base de cemento portland, y con ello contribuir con la disminución en el uso del mismo y por ende, las emisiones de CO<sub>2</sub> propias de la industria cementera a nivel mundial.

## **ABSTRACT**

The present research work focuses on the analysis of different mix designs for alkaline activated fly ash mortars, with which it is sought to identify the most relevant design criteria, unite them in a single theoretical design and finally demonstrate, from theory, the possibility of considering it as a viable replacement option for conventional Portland cement-based mortar mixtures, seeking to contribute to the reduction in its use and therefore, the CO<sub>2</sub> emissions of the cement industry worldwide.

# CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>14</b>
<b>2. ANTECEDENTES</b>	<b>16</b>
<b>3. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.</b>	<b>20</b>
3.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	20
3.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	20
<b>4. OBJETIVOS</b>	<b>22</b>
4.1. GENERAL	22
4.2. ESPECÍFICOS	22
<b>5. METODOLOGÍA</b>	<b>23</b>
<b>6. MARCO DE REFERENCIA</b>	<b>24</b>
6.1. MARCO TEÓRICO	24
6.1.1. ¿QUÉ ES UN MORTERO?	24
6.1.2. ÁRIDOS	24
6.1.3. PROPIEDADES DE LOS MORTEROS	25
6.1.3.1. PROPIEDADES EN ESTADO PLÁSTICO	26
6.1.3.2. PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO	27
6.1.4. TIPOS Y USOS DE LOS MORTEROS	30
6.1.4.2. MORTEROS CALCÁREOS	30
6.1.4.3. MORTEROS DE CAL Y CEMENTO PORTLAND	31
6.1.4.4. MORTEROS A BASE DE CEMENTO PORTLAND	32
6.1.6.1. CENIZA VOLANTE	39
6.1.6.2. ACTIVADORES ALCALINOS (AA):	41
6.1.6.3. MOLARIDAD	42
6.1.6.4. MOLALIDAD	42
6.1.6.5. RELACIÓN AA/CV	42
6.2. MARCO LEGAL	43
<b>7. ESTADO DEL ARTE</b>	<b>47</b>
<b>8. ANALISIS BIBLIOGRAFICO</b>	<b>53</b>
<b>9. ANALISIS GENERAL</b>	<b>118</b>
9.1. PROPOSICIÓN DE MEZCLA ACTIVADA	119
<b>10. FACTIBILIDAD ECONÓMICA.</b>	<b>121</b>
<b>11. CONCLUSIONES GENERALES</b>	<b>127</b>
<b>12. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>128</b>



## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Fluidéz recomendada del mortero para diversos tipos de estructuras y condiciones de colocación.	26
<b>Tabla 2:</b> Uso de los Morteros de Cemento	33
<b>Tabla 3:</b> Clasificación ASTM C-47 (INTERNATIONAL, 1997) de Morteros de Pegas Para Mampostería Reforzada, Según Resistencia a la Compresión a 26 Días y Según Dosificación (partes por volumen)	34
<b>Tabla 4:</b> Clasificación ASTM C-476 de morteros de pegas para mampostería reforzada, según resistencia a la compresión a 26 días y según dosificación (partes por volumen).	36
<b>Tabla 5:</b> Mortero de Relleno.	36
<b>Tabla 6:</b> Composición Química del Cemento y la Ceniza Volante.	40
<b>Tabla 7:</b> Límites Para la Composición Química y las Propiedades Físicas de Ceniza Volante.	41
<b>Tabla 8:</b> Fluidéz de Mezclas Activadas Alcalinamente.	56
<b>Tabla 9:</b> Resultados Pruebas de Resistencia a la Compresión.	65
<b>Tabla 10:</b> Distribución de Mezclas de Activación Alcalina.	68
<b>Tabla 11:</b> Resultados Ensayo de Resistencia a la Compresión.	74
<b>Tabla 12:</b> Resultados Ensayo de Resistencia a la Flexión.	75
<b>Tabla 13:</b> Resistencia a Altas Temperaturas, Resultados de Resistencia Compresión y Flexión.	77
<b>Tabla 14:</b> Caracterización Química Ceniza Volante y Metacaolín – FRX.	81
<b>Tabla 15:</b> Ensayo de Resistencia a la Compresión – Pastas de Ceniza tipo F.	83
<b>Tabla 16:</b> Ensayo de Resistencia a la Compresión – Pastas de Ceniza tipo F.	83
<b>Tabla 17:</b> Composición Química de las Cenizas Volantes.	86
<b>Tabla 18:</b> Área Superficial de Cenizas Volantes.	87
<b>Tabla 19:</b> Resistencia a la Compresión CVN y CVB.	88
<b>Tabla 20:</b> Relación Proporción Materiales en Mezcla.	91
<b>Tabla 21:</b> Resistencia a la Compresión.	92
<b>Tabla 22:</b> Composición Química de Cenizas.	95
<b>Tabla 23:</b> Combinaciones de Mezcla de Ceniza Activada.	96
<b>Tabla 24:</b> Resultados de ANOVA para las Diferentes Edades.	99
<b>Tabla 25:</b> Composición Química de Materias Primas.	101
<b>Tabla 26:</b> Composición Química de Materia Prima.	108
<b>Tabla 27:</b> Resumen y Clasificación de Ceniza.	109
<b>Tabla 28:</b> Resistencia a la Compresión.	110
<b>Tabla 29:</b> Dosificaciones de Mezcla Activada.	111
<b>Tabla 30:</b> Resultado Resistencia a la Compresión.	111

<b>Tabla 31:</b> Resultado resistencia a la flexión.	113
<b>Tabla 32:</b> Resultado Resistencia a la Compresión y Flexión a 400°C y 700°C.	115
<b>Tabla 33:</b> Resumen Resultados por Autor.	118
<b>Tabla 34:</b> Dosificación de Mezcla Activada Propuesta	120
<b>Tabla 35:</b> Comparativa Costos de Producción.	125

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Arena (Agregado Fino)	24
<b>Figura 2:</b> Grava(Agregado Grueso)	25
<b>Figura 3:</b> Clasificación de Materiales de Activación Alcalina (AAM).	37
<b>Figura 4:</b> Precios estimados para ceniza volante tipo F	121
<b>Figura 5:</b> Cotización NaOH Químicos Mandarin.	122
<b>Figura 6:</b> Cotización NaOH Químicos Campota.	122
<b>Figura 7:</b> Cotización Arena para Mortero.	123
<b>Figura 8:</b> Cotización Arena para Mortero.	123
<b>Figura 9:</b> Cotización Cemento Gris Tipo I.	124
<b>Figura 10:</b> Cotización Cemento Gris Tipo I.	124

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1:</b> Resistencia a la Compresión de Morteros Activados con NaOH, Relación aa/cv 0,4.	57
<b>Gráfico 2:</b> Resistencia a la Compresión de Morteros Activados con NaOH, Relación aa/cv 0,4.	57
<b>Gráfico 3:</b> Resistencia a la Compresión de Morteros Activados con NaOH, Relación aa/cv 0,5.	58
<b>Gráfico 4:</b> Resistencia a la Compresión de Morteros Activados con NaOH, Relación aa/cv 0,4 Concentración 6-10.	58
<b>Gráfico 5:</b> Resistencia a la Compresión de Morteros Activados con Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> , Relación aa/cv 0,4 Concentración 3-10%.	60
<b>Gráfico 6:</b> Activación Modificando el Módulo del Silicato Entre 0,75 y 1,8.	61
<b>Gráfico 7:</b> Activación con Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> con Diferente Concentración.	61
<b>Gráfico 8:</b> Resumen de Resultados, Resistencia a la Compresión.	62
<b>Gráfico 9:</b> Resumen de Ensayo de Resistencia a la Compresión.	66
<b>Gráfico 10:</b> Mezclas de Mortero Activado Alcalinamente Curadas a una Temperatura de 80°C Durante 24 Horas.	69
<b>Gráfico 11:</b> Mezclas de mortero activado alcalinamente curadas 7 días a temperatura ambiente.	70
<b>Gráfico 12:</b> Mezclas de mortero activado alcalinamente curadas 14 días a temperatura ambiente.	70
<b>Gráfico 13:</b> Mezclas de Mortero Activado Alcalinamente Curadas 28 días a Temperatura Ambiente.	71
<b>Gráfico 14:</b> Mezclas de Mortero Activado Alcalinamente (NaOH 10M y 12M) Curadas Durante 24 Horas a 80°C.	72
<b>Gráfico 15:</b> Resistencia a la Compresión.	76
<b>Gráfico 16:</b> Resistencia a la Flexión.	76
<b>Gráfico 17:</b> Resistencia a la Compresión Luego de Exposición a Altas Temperaturas.	78
<b>Gráfico 18:</b> Resistencia a la Flexión luego de Exposición a altas Temperaturas.	79
<b>Gráfico 19:</b> Resistencia a la Compresión – NaOH 5 mol.	84
<b>Gráfico 20:</b> Comparativa Resistencia a la Compresión CV – CP.	89
<b>Gráfico 21:</b> Resistencia a la Compresión.	92
<b>Gráfico 22:</b> Difracto Grama de Cenizas.	95
<b>Gráfico 23:</b> Resistencia a Compresión Curado a 8°C.	97
<b>Gráfico 24:</b> Resistencia a Compresión Curado a 18°C.	97
<b>Gráfico 25:</b> Resistencia a Compresión Curado a 28°C.	98
<b>Gráfico 26:</b> Resistencia a Compresión Curado a 38°C.	98
<b>Gráfico 27:</b> Resistencia a la Compresión Vs Tiempo.	102
<b>Gráfico 28:</b> Resistencia al Flexo Tracción Vs Tiempo.	103

<b>Gráfico 29:</b> Porcentaje de retracción según Humedad Relativa (99% & 50%)	104
<b>Gráfico 30:</b> Resistencias Mecánicas Obtenidas.	105
<b>Gráfico 31:</b> Resistencias a Compresión Cubos de Mortero.	112
<b>Gráfico 32:</b> Comportamiento de Mezclas – Flexión.	114
<b>Gráfico 33:</b> Resistencias Mecánicas Tras Exposición a Altas Temperaturas.	115
<b>Gráfico 34:</b> Resistencias a compresión comparación con mezclas no expuestas a Altas Temperaturas.	116

## 1. INTRODUCCIÓN

El acelerado crecimiento de la sociedad ha contribuido con el aumento del calentamiento global. La industria cementera a nivel mundial es considerada, hoy en día, uno de los factores que más aportan a dicha problemática, se estima que, para la elaboración de Clinker, componente primario del cemento convencional, se emplean alrededor de 1,5 toneladas de material natural para producir una tonelada del material cementante (Fernandez-Jimenez, 2012), en el proceso se genera la misma cantidad en emisiones de CO<sub>2</sub> y otros gases contaminantes que intervienen directamente en el efecto invernadero. Esta situación evidencia la necesidad por desarrollar materiales cementantes que, sin sacrificar prestaciones, permitan lograr una disminución efectiva del consumo de energía y racionalizar el uso de los recursos naturales.

Por esta razón, se busca implementar nuevos materiales residuales para reemplazos parciales o totales del cemento Portland tradicional. En Colombia se producen más de 80.000 millones de toneladas de carbón térmico (BILIM, 2002). El carbón térmico que se produce en el interior del país abastece el mercado doméstico, que lo destina a la generación eléctrica, como fuente de energía primaria y secundaria en la industria. El carbón se emplea en las centrales termoeléctricas para producir energía, y uno de los residuos de la calcinación del carbón en los combustores es la ceniza volante. Es así como se requiere una urgente necesidad para disponer de grandes cantidades de ceniza volante generadas anualmente en Colombia, y una alternativa para el aprovechamiento de estos residuos se orienta hacia la activación alcalina de estos materiales para conformar elementos con propiedades mecánicas competentes.

Con el presente proyecto se pretende analizar el comportamiento mostrado en diferentes diseños de mezcla de morteros de ceniza volante activados alcalinamente, los cuales fueron propuestos por diferentes autores, mediante la comparación entre cada uno de los resultados obtenidos por estos, se buscará, desde la teoría y metodología aplicada por cada autor, identificar las condiciones que influyen en el desempeño óptimo de un diseño de mezcla activado alcalinamente, posteriormente se presentará el diseño de mezcla de ceniza volante activado alcalinamente que reúna

los mejores atributos. Por otro lado, es necesario aclarar que la ceniza volante (ceniza de fondo o escoria de alto horno) proveniente de termoeléctricas, puede presentar variaciones en cuanto a su composición química, por lo que solo se tendrán en cuenta textos donde se aplique la ceniza volante clase F, como el tipo de ceniza seleccionada y el hidróxido de Sodio (NaOH) y silicato de Sodio ( $Na_2SiO_3$ ), los activadores alcalinos presentes en el correspondiente análisis.

## **2. ANTECEDENTES**

A pesar de dar la impresión de ser una temática reciente, lo cierto es que desde principios del siglo pasado ya se tenían registros del desarrollo de compuestos de naturaleza alcalina y material puzolánico, en los cuales se generaban cadenas poliméricas, debido a esta relación posteriormente se introdujo el termino Geopolímeros para identificar los materiales resultantes de esta reacción, perteneciente a la familia de polímeros inorgánicos. La composición química del material geopolímeros es similar a los materiales zeolíticos naturales, pero la microestructura es amorfa. Fueron los científicos Víctor Glukhovsky y Pavel Krivenko, principalmente el primero, quienes preguntándose por qué las estructuras y edificios de la antigüedad, pirámides en especial, duraban tanto, los analizaron y observaron que tras la presencia de alcalinos libres en las matrices cerámicas podría estar la respuesta. (Rangan, 2008)

El proceso de polimerización implica una reacción química sustancialmente rápido bajo condiciones alcalinas en minerales SiAl, también conocidos como aluminosilicatos inorgánicos, que resulta en una estructura de cadena y el anillo polimérico tridimensional que consiste en enlaces Si-OAl-O (Davidovits, 1994).

Algunos estudios que se han realizado sobre Aluminosilicatos y concretos de activación alcalina:

### **GLUKHOVSKY, KRIVENKO Y DAVIDOVITS**

Primeras escorias alcalinamente (activador) activadas mediante productos CHS y aluminosilicatos (llamado precursor) hidratados (deben ser descubiertos e utilizados) que se usan en la construcción Glukhovsky y Krivenko(1950), Glukhovsky en 1967 desarrolló un cementante a partir de una arcilla y soluciones constituidas con metales alcalinos y más adelante en 1979, La mezcla de la fuente de aluminosilicato y el activador alcalino promueve una serie de reacciones



(geopolimerización) que se puede desarrollar mediante las siguientes etapas: Disolución de las especies de Si y Al del precursor seguido de la precipitación de las especies disueltas y la posterior policondensación y formación de los productos de reacción con un alto grado de amorficidad, Davidovits otorgó el nombre de “geopolímeros” (término acuñado) a los cementantes producidos a partir de la activación alcalina de minerales basados en aluminosilicatos, específicamente aquellos constituidos con arcillas calcinadas. (Marisol Gordillo, 2013)

### **DAVIDOVITS Y ORLINSKY**

Los polímeros inorgánicos, también conocidos en algunas literaturas como geopolímeros, son materiales de gran interés en el campo de la construcción, ya que presentan valores de resistencia y durabilidad comparables con los reportados para el CP. Estos polímeros son sintetizados a partir de aluminosilicatos, fuentes de óxidos de silicio y de aluminio, activados por un agente alcalino (RODRÍGUEZ, 2012).

### **WASTIESL ETAL**

Los materiales geopoliméricos son una nueva clase de polímeros inorgánicos que se pueden formar a base de aluminosilicatos (cenizas volantes). Los geopolímeros cuentan con un extenso campo de aplicación predominando el uso como cementantes, ladrillos refractarios, o precursores cerámicos. En este trabajo se obtuvieron cenizas volantes de cáscara de trigo de residuo mediante un proceso térmico de calcinación a 1100°C. El análisis termogravimétrico reveló que la cantidad de ceniza en la vaina de trigo fue de 16 %. Con estas cenizas volantes se obtuvieron la formación de geopolímeros mediante una activación alcalina, con hidróxido de sodio en diferentes concentraciones: 8M, 12M y 16M. Subsecuentemente, se evaluó la resistencia a la compresión en especímenes elaborados y evaluados con diferentes tiempos de curado 7, 14 y 21 días, a 20°C. (Hernández-Escobar, 2017)

## **XU AND VAN DEVENTER**

La geopolimerización es una reacción geo sintética de aluminosilicatos en un fuerte medio alcalino, a baja temperatura. La reacción comienza cuando se ponen en contacto un material compuesto fundamentalmente por aluminio y silicio (en forma de aluminosilicato) con una solución activadora alcalina, que consigue la formación de una estructura nueva formada por cadenas poliméricas. Dichas cadenas surgen a raíz de la policondensación de los iones silicato y aluminato que forman unidades tetraédricas llamadas silato. Es una reacción que incluye la condensación y polimerización de iones ortosilicatos que son considerados como hipotéticos monómeros (Lora, 2016)

## **DAVIDOVITS**

La escoria granulada de alto horno (BFS), está compuesta fundamentalmente de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{MgO}$ , la cantidad en que se presenta depende fundamentalmente de la composición química de mineral de hierro, de la caliza y el coque utilizado en el proceso y las condiciones de operación del horno. La BFS tiende a fraguar y reaccionar con el agua, entre los factores que pueden modificar esto se incluyen la composición química, el contenido de vidrio y la finura. Si se considera la composición química, existen parámetros tales como el coeficiente de basicidad ( $\text{CaO} + \text{MgO} / \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ ) y el coeficiente de calidad ( $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2)$ ) (Wang et al., 1994; Talling & Brandstetr, 1989). Sin embargo, no siempre hay una buena correlación entre la fuerza mecánica de AAM y estos parámetros. En general, BFS amorfo con relaciones  $\text{CaO} / \text{SiO}_2$  entre 0,5 y 2; proporciones  $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$  entre 0,1 y 0,6 serán considerado adecuado para la activación alcalina (Talling & Brandstetr, 1989). (GUTIÉRREZ, 2017)

## **PROVIS Y VAN DEVENTER**

Los geopolímeros son polímeros sintéticos inorgánicos de aluminosilicatos, de estructura amorfa y tridimensional, que proceden de una reacción química llamada geopolimerización. Son aluminosilicatos alcalinos que forman unidades tetraédricas, mediante uniones aleatorias formadas gracias al silicio y el aluminio, y cationes alcalinos hidratados como  $K^+$  o  $Na^+$  localizados en los huecos. En los últimos 30 años, esta rama de estudio ha sido de gran interés para estabilizar residuos sólidos<sup>25</sup> incluidos residuos peligrosos y nucleares.

Además, los geopolímeros tienen propiedades cementicias comparables al cemento Portland, esto sumado a la baja generación de  $CO_2$  en su producción, hacen de ellos unos potenciales sustitutivos del mismo. La producción de geopolímeros llega a generar alrededor de un 80% menos de  $CO_2$  que el cemento Portland. No solo eso, si no que los estudios también han demostrado su durabilidad. Además de otras propiedades como: Baja permeabilidad, buena resistencia a ciclos de hielo-deshielo<sup>32</sup> y gran resistencia ante la acción de los ácidos<sup>33</sup>, fácil adhesión a hormigones, acero, vidrio y cerámica y producción de superficies con alta suavidad y precisa moldeabilidad, lo que hace que estos materiales sean usados para el tallado y el moldeo de objetos incluidos objetos artísticos. (Lora, 2016)

### **3. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.**

#### **3.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

Recientemente se ha observado el crecimiento del capital del país, así como la implementación e inversión en zonas de comercio e industria, estos mercados exigen zonas adecuadas de almacenamiento y vías de comunicación. También el incremento de la población mundial demanda cada día mayores unidades de vivienda que provean refugio a cada uno de los habitantes. (nacional, 2014)

Debido a estos avances se requieren diferentes materiales que permitan optimizar la elaboración de mezclas, rellenos y tratamientos que cumplan las especificaciones técnicas sin alterar el presupuesto de la nación.

También durante los próximos años se estima un agotamiento de los recursos naturales utilizados para la fabricación del cemento Portland tradicional tal como las fuentes de piedra caliza entre otros. (development, 2019)

Conocido el impacto ambiental que genera la fabricación del cemento Portland, se requieren materiales cementantes alternativos ambientalmente sostenibles como reemplazo del cemento tradicional, y en esa vía, los materiales de activación alcalina o geopolímeros pueden representar una solución ya que por su empleo para la fabricación de mezclas cementantes, la reducción de las emisiones contaminantes puede llegar a ser hasta del 80%. (Guzmán, 2001).

#### **3.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

¿Qué se quiere lograr con la investigación?

Se pretende presentar un diseño, de carácter teórico, para mezcla de morteros de activación alcalina basados en ceniza volante, con el fin de demostrar las ventajas que

este puede ofrecer y los parámetros que inciden directamente en sus propiedades mecánicas.

¿Qué se busca conocer?

Se busca identificar qué efecto tienen cada uno de los parámetros de mezcla (contenido cementante, dosificación de activadores, relaciones molares, etc.) sobre el comportamiento en estado fresco y el comportamiento mecánico de morteros de ceniza volante activados alcalinamente.

¿A dónde se quiere llegar?

Se pretende llegar a comparar las ventajas ofrecidas por un diseño teórico de mezcla de ceniza volante activada alcalinamente, frente a un diseño de mezcla convencional de cemento portland (OPC), y finalmente determinar, entre otras, si este es viable económicamente para su producción y uso como reemplazante a las mezclas de mortero a base de cemento portland.

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1.GENERAL**

- Analizar los costos de producción de una mezcla de mortero con base en la activación alcalina de cenizas volantes versus una mezcla de concreto hidráulico a base de cemento portland convencional, para evaluar su factibilidad económica.

### **4.2.ESPECÍFICOS**

- Categorizar mediante bibliografía científica disponible, en las bases de datos indexadas, las materias primas (ceniza volante y agregados) y los activadores químicos empleados en la fabricación de los morteros de activación alcalina.
- Comparar diferentes diseños de mezcla de morteros de activación alcalina presentes en la bibliografía científica disponible.
- Mencionar propiedades mecánicas, ventajas y desventajas que presentan cada uno de las mezclas de mortero con base a la activación alcalina de cenizas volantes respecto al concreto hidráulico a base de cemento portland.
- Identificar los factores que inciden en el costo de producción de morteros con base en la activación alcalina de ceniza volante.
- Seleccionar la dosificación idónea para un diseño de mezcla para mortero con base en la activación alcalina de ceniza volante.
- Comparar costos de producción entre la mezcla de activación alcalina seleccionada y la mezcla de control a base de cemento portland convencional.

## **5. METODOLOGÍA**

Para el desarrollo del presente trabajo de investigación se planteó realizar el análisis bibliográfico de textos científicos en los cuales el tema central es el desarrollo de mezclas de mortero de activación alcalina con cenizas volantes como material aglutinante, para ello se analizaron los objetivos planteados por cada autor, se compararon las metodologías usadas, y los resultados obtenidos. Luego se realizó una selección de las condiciones que, a juicio propio, favorecen el comportamiento reológico de las mezclas analizadas y se propuso un diseño único con estas, teniendo en consideración la compatibilidad de las mismas.

Adicionalmente, se realizó la comparación entre una mezcla de mortero a base de cemento portland ya definida y el diseño teórico de la mezcla de mortero de activación alcalina obtenido en el paso anterior. La selección de dicha mezcla se realizó de acuerdo a las prestaciones del diseño teórico a fin de que sean similares. Posteriormente, se estableció el costo aproximado de producción de cada una de las mezclas, a fin de evaluar si su producción resulta conveniente en términos económicos, y así proponer el diseño de mezcla de activación alcalina como opción de remplazo a una mezcla de mortero convencional.

Para finalizar, se analizaron otros factores propios de la producción de mezclas, tal como la disponibilidad y disposición de insumos, logística, producción en obra, entre otros, con lo cual se presenta un enfoque general de la aplicación de la técnica analizada en la realización de proyectos constructivos.

## 6. MARCO DE REFERENCIA

### 6.1.MARCO TEÓRICO

#### 6.1.1. ¿QUÉ ES UN MORTERO?

El mortero puede ser definido como la mezcla de material aglutinante (cemento portland y/o otros cementantes), un material de relleno (agregado fino o arena), agua y eventualmente aditivos, que cuando endurece presenta propiedades químicas, físicas y mecánicas similares a las del concreto y es ampliamente utilizado para pegar piezas de mampostería en la construcción de muros, o para recubrirlos, en este caso se le conoce como pañete, repello o revoque. (Guzmán, 2001)

#### 6.1.2. ÁRIDOS

- **Arena:** material de origen natural que se emplea como componente en mezclas de concreto. El uso más conocido de la arena en la industria de la construcción es, como mencionábamos, para preparar la mezcla que produce el cemento de mortero u concreto. Muchas veces, la calidad del cemento depende en gran medida del tipo de arena que se agregue a la mezcla. La arena con demasiadas impurezas tiene un impacto negativo en el resultado del concreto, provocando que éste tenga menos dureza o que afecte el tiempo de secado. (bloques cando S.A., 2005)

**Figura 1:**

*Arena (Agregado Fino)*



Fuente: <https://bloquescando.com/materiales-de-construccion-la-arena/>



- **Grava:** Se denomina grava a las rocas de tamaño comprendido entre 2 y 64 mm, suele suceder que el desgaste natural producido por el movimiento en los lechos de ríos ha generado formas redondeadas, pasando a conocerse como canto rodado. Existen también casos de gravas naturales que no son cantos rodados.

La grava se usa como árido en la fabricación de concretos. También como lastre y revestimiento protector en cubiertas planas no transitables, y como filtrante en soleras y drenajes. (MATERIALES DE LA CONSTRUCCION , 2001)

**Figura 2:**

*Grava(Agregado Grueso)*



*Fuente: <http://materiales-de-construccion-ujcv.blogspot.com/2012/01/>*

### **6.1.3. PROPIEDADES DE LOS MORTEROS**

Para la implementación de morteros en obra, lo acostumbrado es definir la dosificación de acuerdo a partes de arena por parte de material cementante (1: n), la mayoría de las veces haciéndose caso omiso, o desconociéndose, la resistencia que dichos morteros así dosificados obtendrán una vez fraguados. Es claro entonces que, planteada la necesidad de diseñar y dosificar el mortero de acuerdo con las condiciones de resistencia particulares y algunas otras propiedades y características tan importantes como las presentadas a continuación: (Guzmán, 2001):

### 6.1.3.1. PROPIEDADES EN ESTADO PLÁSTICO

#### 6.1.3.1.1. MANEJABILIDAD

Al igual que en concreto, es una medida de la facilidad de colocación de la mezcla, en este caso en las unidades de mampostería o en revestimiento. La manejabilidad está relacionada con la consistencia, la cual se refiere al estado de fluidez del mortero, es decir, que tan dura (seca) o blanda (fluida) es la mezcla cuando se encuentra en estado plástico.

Se acepta como medida de la manejabilidad, la característica de fluidez de la mezcla medida en el ensayo de la mesa de flujo (ASTM C-230), aunque hasta el momento dicha propiedad ha dependido de la apreciación subjetiva del albañil o el mampostero. Sin embargo, en la tabla 14.5 se sugiere una guía de la manejabilidad requerida para diferentes tipos de construcción y sistema de colocación, en la cual se definen tres tipos de consistencia y fluidez del mortero. (Guzmán, 2001)

**Tabla 1:**

*Fluidez recomendada del mortero para diversos tipos de estructuras y condiciones de colocación.*

CONSISTENCIA	FLUIDEZ %	CONDICIONES DE COLOCACION	EJEMPLOS DE TIPOS DE ESTRUCTURA	EJEMPLO DE SISTEMA DE COLOCACION
Dura (seca)	80 - 100	Secciones sujetas a vibración	Reparaciones, recubrimiento de túneles, galerías, pantallas de	Proyección neumática, con vibradores de formaleta
media (plástica)	100 - 120	Sin vibración	Pega de mampostería, baldosines, pañetes y revestimientos	Manual con palas y palustres
Fluida (húmeda)	120 - 150	Sin vibración	Pañetes rellenos de mampostería estructural, morteros autonivelantes para	Manual, bombeo, inyección

*Fuente de (Guzmán, 2001)*

#### **6.1.3.1.2. RETENCIÓN DE AGUA**

Esta propiedad es una medida de la habilidad del mortero para mantener su plasticidad cuando quede en contacto con una superficie absorbente, como una pieza de mampostería. Como ya se vio, la retención de agua puede ser mejorada mediante la adición de cal, dada su capacidad plastificante, aunque no necesariamente, ya que hoy en día se tienen otras alternativas igualmente satisfactorias como son: mayores contenidos finos, la adición de aditivos plastificantes y agentes incorporadores de aire o simplemente utilizando cementos puzolánicos o cementos de adición, con carga inerte de cada día cobran mayor importancia y son muy comunes en Colombia. (Guzmán, 2001)

#### **6.1.3.1.3. VELOCIDAD DE ENDURECIMIENTO**

Los tiempos de fraguado inicial y final de la mezcla de ben estar entre limites adecuados. Por lo general, se aceptan valores entre dos y 24 horas, respectivamente. Sin embargo, estos dependen de diversos factores tales como las condiciones del clima o la composición de la mezcla y hoy en día son fácilmente controlables con el uso auditivos. (Guzmán, 2001)

### **6.1.3.2. PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO**

#### **6.1.3.2.1. RETRACCIÓN**

La retracción se debe principalmente a reacciones químicas de hidratación de la pasta sobre todo en pastas puras con una alta relación agua-cemento. La arena soluciona el problema en parte, especialmente si es de textura rugosa, ya que forma un esqueleto que evita los cambios de volumen y el peligro de agrietamiento. En zonas calurosas y de muchos vientos, el agua de mezclado tiende a evaporarse produciendo tensiones

internas en el mortero, que se expresan en la formación de visibles grietas. Lo mismo ocurre si la base es muy absorbente. Aparentemente (Guzmán, 2001) la retracción es proporcional al espesor de la capa de mortero y a la riqueza del cemento. Para evitar la retracción es conveniente usar cementos de baja retracción al secado (puzolánicos o con adición inerte) y arenas de buena granulometría con pocos finos. (Guzmán, 2001)

#### **6.1.3.2.2. ADHERENCIA**

La adherencia es la capacidad que tiene el mortero de absorber tensiones normales y tangenciales a la superficie que une el mortero con la estructura. Es de gran importancia, ya que a ella se debe el hecho de que un mortero pueda resistir pandeo, cargas transversales y excéntricas, dándole resistencia a la estructura.

Morteros de baja capacidad de retención de agua y morteros de baja resistencia se adhieren solo partes por lo que su adherencia es pobre. En el caso de la mampostería, para obtener una buena adherencia es necesario que la superficie del bloque sea tan rugosa como sea posible para permitir la unión mecánica del mortero y además debe tener un nivel de absorción adecuado y compatible con la mezcla del mortero (Guzmán, 2001)

#### **6.1.3.2.3. RESISTENCIA**

Una vez aplicado en obra, el mortero debe actuar como unión resistente. Se requiere una alta resistencia a la compresión cuando el mortero deba soportar cargas altas y sucesivas. Siendo esta un indicio de las resistencias a tensiones de corte y a tensiones de tracción.

Hoy dos leyes fundamentales que se aplican a la resistencia de un mortero compuesto del mismo cemento con diferentes proporciones y tamaños de arena, la primera dice: con un mismo agregado, el mortero más resistente e impermeable es aquel que tiene mayor porcentaje de cemento en un volumen dado de mortero; y la segunda: con el

mismo porcentaje de cemento en un volumen de mortero, el más resistente y generalmente más impermeable es aquél que tenga la mayor densidad, o sea aquél que en una unidad de volumen contenga el mayor porcentaje de materiales sólidos. El tamaño de los granos de arena está subordinado en su influencia sobre la resistencia y otras cualidades del mortero a la densidad del mortero producido. Se puede suponer que una arena densa, o sea aquella que contenga seca el menor volumen de poros, al ser mezclada con una proporción dada de cemento, producirá el Mortero más denso y en consecuencia resistente.

El volumen total de mortero de consistencia plástica será afectado por la cantidad de agua usada y por los volúmenes de los materiales secos. Por ello un mortero hecho de arena fina y cemento será menos denso que uno hecho con arena gruesa y el mismo cemento, aunque ambas arenas al ser pesadas secas contengan la misma proporción de sólidos y poros. La arena fina tiene más granos en su unidad de volumen, por consiguiente, un mayor número de puntos de contacto (Guzmán, 2001)

#### **6.1.3.2.4. DURABILIDAD**

Al igual que en el concreto la durabilidad del mortero es la resistencia a los agentes bajas temperaturas, la penetración de agua, desgaste por abrasión, retracción al secado eflorescencia, agentes corrosivos, o choques térmicos, entre otros, sin deterioro de sus condiciones fisicoquímicas con el tiempo.

En general, se cree que morteros de alta resistencia a la comprensión tienen una buena durabilidad; sin embargo, el uso de agentes inclusores de aire es de particular importancia en ambientes húmedos, ambientes marinos y en general en condiciones de ambiente agresivo. (Guzmán, 2001)

#### **6.1.3.2.5. APARIENCIA**

Un aspecto generalmente olvidado del concreto que cobra mayor importancia en el mortero de su apariencia, especialmente en mampostería de ladrillo a la vista. En este

caso, la plasticidad de la mezcla, la selección y la dosificación adecuada de sus componentes, son de vital importancia en la colocación y el acabado de las superficies. El color y la textura pueden mejorarse con colorantes inorgánicos o con aditivos especiales. (Guzmán, 2001)

#### **6.1.4. TIPOS Y USOS DE LOS MORTEROS**

Dentro de los morteros se pueden distinguir dos familias: aéreos e hidráulicos. Los primeros endurecen con la influencia del aire sin perder agua por secado al aire y fraguan lentamente por un proceso de carbonatación. Los hidráulicos, también llamados acuáticos, endurecen bajo el agua, ya que, al igual que los cementos naturales, poseen en su composición constituyentes que se obtienen por calcinación de calizas impurificadas con sílice y alúmina que le permiten desarrollar resistencias iniciales relativamente altas.

##### **6.1.4.1. MORTEROS DE YESO**

Son morteros de bajo desempeño elaborados a base de yeso, arena y agua. Se los usa escasamente en la colocación de pequeñas piezas de mampostería siempre y cuando no intervengan cargas considerables sobre estas, es de fraguado rápido lo que puede hacerlo susceptible a fisuras tempranas. Es de escaso uso debido a su susceptibilidad a la humedad.

##### **6.1.4.2. MORTEROS CALCÁREOS**

La cal es un plastificante y un ligador conocido. Estas características hacen del mortero de cal el más manejable de los conocidos. Sin embargo, no pueden esperarse altas resistencias a temprana edad, debido a su baja velocidad de endurecimiento. Las cuales aéreas más conocidas son la cal blanca y la cal gris (cal dolomítica). La

arena en este caso en realidad constituye un material inerte cuyo objetivo principal es evitar el agrietamiento y contracción del mortero, para lo cual se recomienda que tenga partículas las angulosas y esté libre de materia orgánica piedras grandes y arcilla. Las proporciones cal-arena más usadas en morteros aéreos son 1:2 para pañetes (revoques) y 1:3 o 1:4 para mampostería simple. Si la proporción aumenta, el mortero es más magro y pierde ductilidad y trabajabilidad; y si el mortero es más graso, pueden ocurrir contracciones y agrietamientos no deseables, especialmente en pañetes.

La realidad es que esto depende mucho del conocimiento de los materiales y de la experiencia del albañil. Su uso es limitado ya que no existe hoy en día ningún procedimiento que permita medir la capacidad de endurecimiento. Actualmente en el país se le ha utilizado únicamente en trabajos de embellecimiento de interiores donde se requieren esquinas perfectas y delicadeza en los acabados. (Guzmán, 2001)

#### **6.1.4.3. MORTEROS DE CAL Y CEMENTO PORTLAND**

Cuando se busca una gran trabajabilidad, buena retención de agua y altas resistencias iniciales, este tipo de mortero es aconsejable. Utilizando como base un mortero 1:3 se puede ir sustituyendo parte del cemento por cal.

Estos morteros reciben el nombre de “morteros de cementos rebajados” cuando el contenido de cemento es escaso. Las relaciones de mezclas más usadas varían de 1:2:6 a 1:2:10 (cemento: cal: arena). La cantidad de agua se encuentra dentro de amplios límites, de acuerdo con la composición del mortero y la consistencia deseada. Si el contenido del cemento es alto, las características son alta resistencia y poco tiempo entre amasado y colocación; será más o menos trabajable y habrá contracción (3%) si está muy seco. Si el contenido de cal es alto, tendrá menos resistencia, será mayor el tiempo entre amasado y colocación, será más plástico y permeable, pero mostrará más retracción (9%). Si el contenido de arena es alto, la resistencia disminuirá considerablemente y será poco trabajable pero el mortero tendrá poca retracción. Para lograr las condiciones deseadas debe buscarse una combinación adecuada. (Guzmán, 2001)

Tal vez la norma más difundida es la ASTM C-270, la cual clasifica los morteros de pega, por propiedades mecánicas y por dosificación (INTERNATIONAL, 1997). En esta norma se aceptan cinco tipos de morteros designados con las letras M, S, N, O y K en orden descendente de calidad.

Los materiales para utilizar deben cumplir con las siguientes normas:

- Cemento portland: ASTM C-150
- Cemento hidráulico mezclado: ASTM C-595
- Cemento de albañilería: ASTM C-91
- Cal hidratada, tipo S de ASTM C-207
- Cal viva: ASTM C-5
- Agregados finos: ASTM C-144
- Agregados gruesos (para morteros de rellenos): ASTM C-404
- Agua: limpia y libre de cantidades perjudiciales y aceites, ácidos, álcalis, sales, materia orgánica

#### **6.1.4.4. MORTEROS A BASE DE CEMENTO PORTLAND**

El mortero de cemento está constituido por un esqueleto de granos de arena, tangentes entre sí. Con el cemento se pretende darle una soladura perfecta de manera tal, que cada grano quede cubierto por una fina película de cemento. Como además el mortero deberá formar una masa homogénea y compacta, las características de la arena, tales como: la granulometría, módulo de finura, forma y textura de las partículas, deben ser las adecuadas para lograr un acomodamiento de partículas que permiten la mayor capacidad y el menor consumo de cemento.

Finalmente, tampoco deben prepararse morteros muy ricos para usos normales ya que pueden ser demasiados resistentes y con alta retracción al secado, y por ello susceptibles al agrietamiento. Sin embargo, la utilidad de morteros de cemento ricos es muy común en obras de ingeniería que exijan grandes resistencias como por ejemplo muros de contención y también para cimientos, ya que por ser morteros duros e impermeables resisten muy bien la acción del agua. Desde luego en estos casos la arena que se utiliza es arena lavada o arena de río. En cuanto a los usos, en el medio



colombiano se han clasificado los morteros de cemento de acuerdo con la experiencia a la proporción cemento: se observa en la tabla 4 (Guzmán, 2001)

**Tabla 2.** *Uso de los Morteros de Cemento*

MORTEROS	USOS
1:1	Mortero muy rico para impermeabilización. Rellenos.
1:2	Para impermeabilizaciones y pañetes de tanques subterráneos. Rellenos.
1:3	Impermeabilizaciones menores. Pisos.
1:4	Pega para ladrillos en muros y baldosines. Pañetes finos.
1:5	Pañetes exteriores: pega para ladrillos y baldosines, pañetes y mampostería en genera. Pañetes no muy finos.
1:6 y 1:7	Pañetes interiores: pega para ladrillos y baldosines, pañetes y mampostería en genera. Pañetes no muy finos.
1:8 y 1:9	Pegas para construcciones que se van a demoler pronto. Estabilización de taludes en cimentaciones

*Fuente: (Guzmán, 2001)*

Los morteros: 1:1 a 1:3 se deben hacer con arenas limpias (lavadas).

Los morteros: 1:4 a 1:6 se requieren con arenas semi-lavada, aunque no es un requisito indispensable.

Los morteros: 1:7 a 1:9 se hacen por lo general con arenas sucias, ya que la poca resistencia que de ellos se espera hace inútil usar arenas buenas.

En resumen, los usos de los morteros de cemento se pueden reunir en cuatro grandes categorías.

**Tabla 3:**

*Clasificación ASTM C-47 (INTERNATIONAL, 1997) de Morteros de Pega Para Mampostería Reforzada, Según Resistencia a la Compresión a 26 Días y Según Dosificación (partes por volumen)*

Tipo de mortero	Resistencia a compresión			Cemento portland	Cemento mampostería	Cal	Agregado fino suelto
	(MPa)	(Kg/cm <sup>2</sup> )	(p.s.i)				
M	17.2	175	2.500	1 1	1 -	0.25	Entre 2.25 y 3 veces la suma de cemento y cal utilizados
S	12.4	126	1.800	0.5 1	1 -	0.25 a 0.50	
N	5.2	53	750	- 1	1 -	0.5 a 1.25	
O	2.4	25	350	- 1	1 -	1.25 a 2.50	
K	0.5	5	75	1	-	2.50 a 4.00	

*Fuente: (Guzmán, 2001)*

- Morteros que provean suficiente resistencia para soportar cargas a compresión, o resistan la abrasión.
- Morteros que mantengan los elementos en la posición deseada.
- Morteros que permitan emparejar ciertas unidades estructurales (revoques y revestimiento)
- Morteros que sirvan como relleno de juntas entre diferentes elementos constructivos (reparaciones de columnas, vigas, etc.).

Mortero tipo M: Con resistencia mecánica superior a los diecisiete mega pascales, son morteros con aplicaciones estructurales diseñados específicamente para la pega de unidades de mampostería como ladrillos y bloques. Se caracterizan por su alta trabajabilidad, adherencia y facilidad de aplicación.

Mortero tipo S: Con resistencia mecánica superior a los doce mega pascales, son morteros con aplicaciones no estructurales para la pega de unidades de mampostería en muros pantalla, de igual forma son usados para el pañetado de los mismos y para plantillas de nivelación en pisos previo a la instalación de acabados.

Mortero tipo N: Con resistencia mecánica superior a los cinco mega pascales, su aplicación se limita a sistemas no estructurales con disipación de energía mínima (DMI), al igual que las categorías anteriores puede ser usado para pega de unidades de mampostería, pero su trabajabilidad lo hace ideal en pañetes donde se resalta su acabado.

Morteros tipo O y K: con resistencia mecánica por debajo de los 2,5 mega pascales este tipo de mortero son de aplicación no estructural generalmente usados en forma de relleno en sistemas de mínima disipación de energía.

Es de resaltar que estos morteros cuentan con un porcentaje de retención de agua mínimo del 75% y contenido de aire entre el 12 y 18%, siendo estos últimos considerados morteros de larga vida, dependiendo de las condiciones de elaboración se pueden incorporar aditivos que mejoren las propiedades de los morteros de acuerdo a la necesidad. Las siguientes normas regulan la incorporación de aditivos:

- Aditivos: ASTM C-494
- Aditivos inclusores de aire: ASTM C-260

El mortero para mampostería sin refuerzo debe ser dosificado y mezclado de acuerdo con esta norma para los tipos M, S, o N. los morteros para mampostería reforzada están regulados por la norma ASTM C-476 en la cual se distinguen los tipos PM y PL. (Observar en la tabla 2) (Guzmán, 2001)

**Tabla 4:**

*Clasificación ASTM C-476 de morteros de pegos para mampostería reforzada, según resistencia a la compresión a 26 días y según dosificación (partes por volumen).*

Tipo de mortero	Resistencia a compresión			Cemento portland	Cemento mampostería	Cal	Agregado fino suelto
	(MPa)	(Kg/cm <sup>2</sup> )	(p.s.i)				
PM	17.2	175	2.500	1	1	0.25 a	2.25 a
PL	17.2	175	2.500	1	-	0.50	3.00

Fuente: (Guzmán, 2001)

En cuanto los morteros de relleno (GROUT), igualmente en la norma ASTM C-476 (INTERNATIONAL, 1997) se encuentran reguladas sus características en donde se distinguen dos tipos: relleno fino, que utiliza agregados finos únicamente (ASTM C-144) (INTERNATIONAL, 1997) y relleno grueso, que utiliza adicionalmente agregados gruesos que pueden tener un tamaño máximo nominal de hasta 12.7 mm (ASTM C-404). (Guzmán, 2001)

**Tabla 5:**

*Mortero de Relleno.*

TIPO DE RELLENO	CEMENTO PORTLAND	CAL	AGREGADO FINO SUELO	AGREGADO GRUESO SUELTO
Relleno fino	1	0 a 0,1	2,25 a 3,0	-
Relleno grueso	1	0 a 0,1	2,25 a 3,0	1 a 2

Fuente (Guzmán, 2001)

En términos generales, todas las normas de los países latinoamericanos están influenciadas por la norma ASTM C-270 y entre los países que marchan adelante en este tipo de construcción están México, Brasil, Argentina y Colombia.

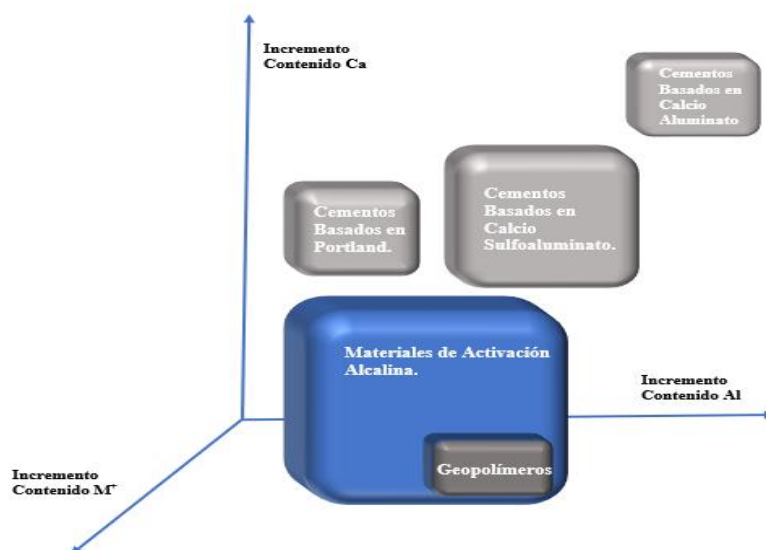
En el caso colombiano, su implementación y desarrollo comenzó hacia el año de 1975, cuando se observó que la resistencia a la compresión de los ladrillos de arcilla con que se construyeron algunos edificios de 5 pisos con muros portantes era baja y que adicionalmente la mampostería portante en ladrillos ofrece muy bajos coeficientes de seguridad para cargas horizontales (sismos). Sin embargo, el desarrollo de los morteros de cemento y cal para este tipo de construcción se ha visto limitado por la mala calidad de cales, por su alto costo y por la falta de normalización. (Guzmán, 2001)

#### 6.1.4.5. CONCRETOS DE ACTIVACION ALCALINA

Tal como se muestra en el informe técnico de la RILEM el nombre más apropiado para las mezclas alcalinas es “materiales de activación alcalina”, con esto se hace claridad sobre el concepto de geopolímeros que constituye una fracción dentro de los materiales de activación alcalina tal como se muestra en la siguiente figura.

**Figura 3:**

*Clasificación de Materiales de Activación Alcalina (AAM).*



Fuente: Provis & Van Deventer, 2014

Si bien se hace esta claridad, en la literatura disponible poco se menciona el termino mortero, esto se debe a que, para este caso, es usado el termino concreto de activacion alcalina, pues es el termino general que agrupa la mezcla de agregados, material aglutinante y activadores alcalinos, y resalta las altas prestaciones que presenta este material.

#### **6.1.5. COMPONENTES DE CONCRETOS DE ACTIVACION ALCALINA**

Los morteros de activación alcalina se pueden fabricar mediante el uso de diferentes materiales cementantes o aglutinantes, pero en años recientes se ha explorado el uso de las cenizas volantes, el cual es un producto residual bajo en calcio (ASTM Clase F) obtenidos a partir de las centrales eléctricas que queman carbón. La mayor parte de la ceniza volante disponible a nivel mundial es baja en calcio cenizas volantes formado como un subproducto de la quema de antracita o carbón bituminoso

El contenido del óxido de hierro por lo general osciló de 10 a 20 % en masa, mientras que el contenido de óxido de calcio era de menos de 5% en masa. El contenido de carbono de las cenizas volantes, como se indica por la pérdida de ignición en masa, era tan bajo como menos de 2% . Las pruebas de distribución de tamaño de partícula revelaron que el 80% de las partículas de ceniza volante (NUÑEZ, 2013)

#### **6.1.6. PROPORCIONES DE LA MEZCLA DE CONCRETO DE ACTIVACION ALCALINA**

La principal diferencia entre el CONCRETO DE ACTIVACION ALCALINA y CONCRETOS de cemento Portland es el aglutinante. Los óxidos de silicio y de aluminio en la baja en calcio cenizas volantes reaccionan con el líquido alcalino para formar la pasta de que une a los agregados sueltos gruesas, agregados finos, y otros materiales sin reaccionar entre sí para formar el hormigón geopolímeros.

Los resultados experimentales (Hardjito y Rangan, 2005) han demostrado lo siguiente:

- Mayor concentración (en términos de molar) de resultados de la solución de hidróxido de sodio en una mayor resistencia a la compresión del hormigón geopolímeros
- Mayor es la relación de silicato de sodio relación de solución de solución de hidróxido de sodio en masa, mayor es la resistencia a la compresión del hormigón geopolímeros.
- La adición de plastificante súper a base de sulfonato de naftaleno, hasta aproximadamente 4% de cenizas volantes en masa, mejora la trabajabilidad del hormigón fresco geopolímeros; sin embargo, hay una ligera degradación de la resistencia a la compresión del hormigón endurecido cuando la dosis súper plastificante es mayor que 2%
- El valor de asentamiento del hormigón geopolímeros fresco aumenta cuando el contenido de agua de la mezcla aumenta. (Rangan, 2008)

#### **6.1.6.1. CENIZA VOLANTE**

Las cenizas volantes se constituyen en un residuo ecológicamente problemático que deben eliminar las centrales termoeléctricas evitando que permanezcan en los depósitos donde son almacenados y ubicadas al aire libre. Esta práctica se convierte en un peligro ambiental, ya que su contacto con el agua, el suelo y el aire, genera graves problemas de contaminación

Es una ceniza con alto contenido en cal ( $\text{CaO} > 10\%$ ) y en sulfato (7,10). Su composición química se presenta en la Tabla 6. Su densidad era de  $2,70 \text{ g/cm}^3$  y con una superficie específica "Blaine" de  $2.900 \text{ cm}^2/\text{g}$ . El retenido de ceniza en el tamiz de 45 mieras fue del 14%. Algunas especificaciones recogidas se presentan en Tabla 6 (BILIM, 2002)

**Tabla 6:** *Composición Química del Cemento y la Ceniza Volante.*

Composicion (Composition)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	LOI
Cemento (Cement)	20.65	5.60	4.13	61.87	2.60	2.79	0.14	0.83	0.5
Ceniza Volante (Fly ash)	18.95	7.53	3.82	51.29	1.58	12.06	0.32	1.51	2.94

*Fuente: (BILM, 2002)*

Actualmente, la normativa americana (ASTM C150, 2012) clasifica la ceniza volante de acuerdo a su composición química:

- Clase N: Pozolanas naturales crudas o calcinadas que cumplan con los requisitos aplicables para la clase, como algunas tierras de diatomeas; lutitas, tobas y cenizas volcánicas y materiales diversos que requieren calcinación para inducir propiedades satisfactorias, tales como algunas arcillas y lutitas.
- Clase F: Este tipo de Ceniza posee propiedades pozolánicas, son Cenizas con bajo contenido de cal y obtenidas a partir de la quema de antracita, carbón bituminoso, a partir de carbón sub-bituminoso y lignito
- Clase C: Esta clase de Ceniza además de tener propiedades pozolánicas, posee propiedades cementantes, Cenizas con alto contenido de carbón proveniente de la quema de carbón sub-bituminoso<sup>4</sup> o lignito y que a su vez puede presentar propiedades hidráulicas. (Guzmán, 2001)



**Tabla 7:**

*Límites Para la Composición Química y las Propiedades Físicas de Ceniza Volante.*

	BSI <sup>12</sup>	ASTM <sup>7</sup> Class F	ASTM <sup>7</sup> Class C	EN <sup>14</sup>	TSI <sup>13</sup>
Humedad (máx) ( <i>Max. Moisture</i> )	0.5	3	3	-	-
Pérdida por calcinación (máx.) ( <i>Max. LOI</i> )	7.0	12	6	5.0	5.0
Contenido de SO <sub>3</sub> (máx) ( <i>Max SO<sub>3</sub></i> )	2.5	5	5	3.0	3.0
Contenido de MgO (máx) ( <i>Max MgO</i> )	4.0	5	5	-	-
Contenido de álcalis (máx) ( <i>Max alkali</i> )	-	1.5	1.5	-	-
Contenido de SiO <sub>2</sub> (mín) ( <i>Min SiO<sub>2</sub></i> )	-	-	40	-	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (mín)	-	70	50	-	-
Cal libre (máx) ( <i>Max free lime</i> )	-	-	-	1.0-2.5	1.0-2.5
Cl % (máx)	-	-	-	0.1	0.1
Índice actividad Pozolánica % (mínimo) ( <i>PAI min</i> )	-	75	75	75% en 28 días (75% at 28 days) 85% en 90 días (85% at 90 days)	75% en 28 días (75% at 28 days) 85% en 90 días (85% at 90 days)
Finura (%) (retenido máximo en tamiz de 45µm) ( <i>Max fineness (%)</i> ) ( <i>remaning on 45 µm size sieve</i> )	12.5	34	34	40	40
Expansión (máx) ( <i>Max expansion</i> )	-	-	-	10 mm	10 mm

Fuente: (BILIM, 2002)

#### 6.1.6.2. ACTIVADORES ALCALINOS (AA):

A diferencia la hidratación en el cemento portland, los materiales de origen silicoaluminoso dependen de una solución alcalina, esta solución es la responsable de la reacción que favorecen la formación de hidratos estables de baja solubilidad y de promover una estructura compacta con estos hidratos. Los activadores son clasificados en seis grupos (Shi, Krivenko & Roy, 2006), estos son:

- Disoluciones causticas: MOH.
- Sales de ácidos débiles: M<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, M<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>, M<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, MF.
- Silicatos: M<sub>2</sub>O.nSiO<sub>2</sub>.
- Aluminatos: M<sub>2</sub>O.nAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.
- Aluminosilicatos: M<sub>2</sub>O.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.SiO<sub>2</sub>.
- Sales de ácidos fuertes: M<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Por otro lado, los cementos activados alcalinamente son clasificados en dos grupos en función del contenido de calcio. El primer grupo con moderado contenido de

calcio, ( $\text{CaO} + \text{SiO}_2 > 70\%$ ), requiere de condiciones alcalinas moderadas y el principal producto de la reacción es el gel de silicato de calcio hidratado (C-S-H) similar al que se producen la hidratación del cemento portland con un pequeño porcentaje de aluminio en su estructura a la cual se denomina para fines prácticos como (C-A-S-H). el segundo grupo está compuesto por materiales con bajo contenido de calcio, lo cual plantea condiciones de activación más fuertes en presencia de soluciones altamente alcalinas, las reacciones son de carácter exotérmico, se encuentran en un rango entre los 60 y 200°C, el principal producto de esta reacción es un polímero alcalino inorgánico denominado gel N-A-S-H (Palomo & Otros, 2014).

#### 6.1.6.3. MOLARIDAD

Es la concentración de una solución expresada en el número de moles disueltos por litro de solución, esta relación es necesaria para elaborar el diseño de la mezcla pues la concentración de agente activador no solo afecta la fluencia del material, también puede llegar a afectar negativamente al generar eflorescencias, consecuencia principal del carbonato de sodio por carbonatación atmosférica.

$$n = \frac{\text{masa}}{\text{masa molar}}$$

#### 6.1.6.4. MOLALIDAD

Al igual que la molaridad es una relación de concentración entre las moles del soluto y la masa del solvente.

$$M = \frac{\text{moles de soluto}}{\text{masa solvente}}$$

#### 6.1.6.5. RELACIÓN AA/CV

En esta relación se representan el peso total de las soluciones alcalinas seleccionadas para la reacción sobre el peso del material cementante (ceniza volante). Esta mantiene una relación directa con la trabajabilidad de la mezcla, haciendo un paralelo con la relación agua/material cementante en mezclas convencionales. Con base a la experiencia se indica que valores entre 0,5 y 0,6 presentan un buen desempeño en

cuanto a trabajabilidad pues se presenta in leve exceso del activador alcalino que conduce a mezclas más porosas (Jiménez y Sánchez, 2007), no se recomiendan valores muy altos puesto que el activador alcalino puede inhibir el proceso de geo polimerización, lo cual puede traducirse en pérdida de la resistencia a la compresión.

#### **6.1.6.6. TEMPERATURA DE CURADO**

En cuanto al curado de las mezclas de activación alcalina se establece una diferencia respecto a su par de cemento portland, esto es debido a que el proceso de activación, para el caso del silicato de sodio ( $\text{NaSiO}_3$ ), requiere aplicación de calor por parte de una fuente externa, esto con el fin de acelerar el proceso de activación ya que al ser este un líquido de consistencia viscosa su incorporación a temperatura ambiente favorece la creación de productos de naturaleza amorfa, mientras que al aplicar temperatura se crean productos de naturaleza cristalina los cuales están ligados a las propiedades mecánicas Wang, Scrivener & Pratt, 1994). Por otro lado En diferentes literaturas establecen el calor de activación para mezclas con silicato de sodio entre los  $50^\circ\text{C}$  y  $70^\circ\text{C}$ .

### **6.2. MARCO LEGAL**

A diferencia de las mezclas de concreto y morteros que incorporan cemento portland, los concretos de activación alcalina a la fecha carecen de una normativa clara que permita establecer estándares de fabricación, determine las cualidades de los precursores a usar y las condiciones con las que deben contar para ser considerados aptos para su uso, adicional, se precisan ensayos de laboratorio propios con los cuales se garantice la uniformidad en el manejo de datos. Solo La Unión de Laboratorios y Expertos en Materiales (RILEM, por sus siglas en francés), ha sido la encargada de establecer el principio de marco normativo para los AAM (Materiales de activación alcalina) a través del comité técnico CT 224 AAM, dicho comité ha contado, desde

su creación en 2006, con la participación de numerosos expertos en materiales a nivel mundial.

La falta de normatividad vigente constituye una de las más significativas desventajas de los AAM respecto a su contraparte, pues debido a esto aún no se puede garantizar, a cabalidad, el uso masivo como material de construcción. Esperamos que pronto la RILEM emita un reglamento sólido, mientras tanto a continuación se presentan como referencia algunas de las diferentes normas aplicadas al cemento portland.

**NTC 221 DENSIDAD:** Tiene por objeto determinar la densidad del cemento hidráulico, su principal utilidad se encuentra relacionada con el diseño y control de mezclas de concreto.

(Educación M. d., Norma Técnica Colombiana - NTC 221 Densidad, 1999)

**NTC33 FINURA:** La importancia de la finura radica en la influencia que puede tener en la velocidad de hidratación, la resistencia inicial y el calor generado (Educación M. d., Norma Técnica Colombiana- NTC33 FINURA, 1999)

**NTC 110 CONSISTENCIA NORMAL:** Tiene por objeto establecer la cantidad de agua requerida para la preparación de pastas de cemento hidráulico de consistencia normal (Educación M. d., 1999)

**NTC 118 TIEMPOS DE FRAGUADO:** Tiene por objeto determinar el tiempo que tarda la pasta en adquirir rigidez, se obtiene un tiempo de fraguado inicial cuando la aguja del aparato obtenga una penetración de 25mm y un tiempo de fraguado final para cuando se obtenga una penetración de 1mm (Educación M. d., 1999)

**NTC 121 ESPECIFICACION DE DESEMPEÑO PARA CEMENTO HIDRÁULICO:**

Mediante la cual se establece un sistema de clasificación para cementos hidráulicos tanto para uso general como uso especial, no restringe la composición del cemento o de sus componentes. Permite el uso de nuevos materiales como puzolanas naturales

y artificiales en función de la durabilidad y versatilidad del concreto. (ICONTEC, 2014).

**NTC 3493 DIÓXIDO DE SILICIO (SIO<sub>2</sub>) + OXIDO DE ALUMINIO (AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)+OXIDO DE HIERRO (FE<sub>2</sub>O<sub>3</sub>):** Se analizó la muestra por fluorescencia de rayos x. Este análisis permite cuantificar la proporción de óxidos presentes en el cemento, los cuales se relacionan entre sí para dar determinadas características al aglomerado (Educacion M. d., Norma tecnica colombiana- NTC 3493 DIÓXIDO DE SILICIO (SIO<sub>2</sub>) + OXIDO DE ALUMINIO (AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)+OXIDO DE HIERRO (FE<sub>2</sub>O<sub>3</sub>): , s.f.)

**NTC 3493 TRIÓXIDO DE AZUFRE:** Tiene por objeto determinar el contenido de Trióxido de Azufre, el cual decide la calidad del cemento, por modificar factores como tiempos de fraguado. (Educacion M. d., Norma Tecnica Colombiana- NTC 3493 TRIÓXIDO DE AZUFRE, s.f.)

**NTC 3493 CONTENIDO DE HUMEDAD:** Tiene por objeto determinar el contenido de humedad de una muestra, la importancia de este radica en el contenido de agua junto con la cantidad de aire, que explica cambios de volumen, estabilidad mecánica. (Educacion M. d., Norma Tecnica Colombiana - NTC 3493 CONTENIDO DE HUMEDAD, s.f.)

**NTC 3493 REQUERIMIENTO DE AGUA:** Tiene por objeto determinar un estimativo del agua requerida por la pasta de mortero. (Educacion M. d., Norma Tecnica Colombiana - NTC 3493 REQUERIMIENTO DE AGUA, s.f.)

**NTC 3493 INDICE DE ACTIVIDAD RESISTENTE:** Tiene por objeto determinar cuándo un aditivo mineral resulta de un nivel aceptable de desarrollo de resistencia, cuando se usa con cemento hidráulico en el concreto. Dado que el ensayo es efectuado con mortero, los resultados pueden no suministrar una correlación directa de cómo contribuye el aditivo mineral en la resistencia del concreto. (Educacion M. d., Norma Tecnica Colombiana - NTC 3493 INDICE DE ACTIVIDAD RESISTENTE , s.f.)

**INVE 213-07 GRANULOMETRÍA:** Este método de ensayo tiene por objeto determinar cuantitativamente la distribución de los tamaños de las partículas de agregados gruesos y finos de un material, por medio de tamices de abertura cuadrada progresivamente decreciente. (VIAS, 2012)

**INVE 212-07 MATERIA ORGÁNICA CONTENIDA:** Tiene por objeto determinar de manera aproximada, la presencia de materia orgánica en arenas usadas en la preparación de morteros o concretos de cemento hidráulico, proporcionando una advertencia sobre las impurezas orgánicas que puedan estar presentes en el material. (VIAS, 2012)

**INVE 222-07 GRAVEDAD ESPECIFICA DE AGREGADOS FINOS:** Esta norma describe el procedimiento que se debe seguir para la determinación de gravedades específicas bulk y aparente  $23 \pm 0.5^\circ\text{C}$ . Determina (después de 15 horas en agua) la gravedad. (VIAS, 2012)

**INVE 222-07 ABSORCIÓN DE AGREGADOS FINOS:** Específica bulk basada en la masa saturada y superficialmente seca del agregado y la absorción. (VIAS, 2012)

**INVE 217-07 DENSIDAD BULK- MASA UNITARIA:** A menudo es utilizado para determinar valores de densidad bulk, que son utilizadas por muchos métodos de selección de proporciones para mezclas de concreto. (VIAS, 2012)

## 7. ESTADO DEL ARTE

Robayo (2013) COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y DURABILIDAD DE MORTEROS DE CENIZAS VOLANTES ACTIVADAS ALCALINAMENTE.

Resumen: En este estudio se emplean mezclas con dosificaciones diferentes, sometiendo dichas mezclas a pruebas de laboratorio que determinaran las propiedades mecánicas y de durabilidad de las probetas de mortero, de esta forma poder dar un estimativo del desempeño y posible uso de dichos morteros. Este proyecto principalmente se encuentra basado en la sustitución de cemento hidráulico convencional, por cenizas volantes activadas alcalinamente, en la producción de mortero, donde se permite obtener un producto que cumple con los requerimientos físicos y mecánicos especificados en las normas NTC. Se trabajarán mezclas con cenizas volantes activadas alcalinamente, provenientes de los procesos energéticos de la empresa textilera Fabricato, estas serán activadas alcalinamente con Hidróxido de Sodio (NaOH) y Silicato de Sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) en diferentes proporciones. De este modo, mediante la evaluación del desempeño mecánico y de la durabilidad de las diferentes mezclas de mortero con cenizas volantes activadas alcalinamente, se pretende dar un paso hacia la implementación de materiales ecológicos de bajo impacto.

Arias (2014) INCIDENCIA DE LA TEMPERATURA AMBIENTE EN LA FORMACIÓN DE COMPUESTOS CEMENTANTES MEDIANTE LA ACTIVACIÓN ALCALINA DE CENIZAS DE CARBÓN.

Resumen: En este trabajo se estudió el efecto de la temperatura ambiente en la formación de fases cementantes cuando se activan alcalinamente cenizas de carbón; correlacionando la mineralogía con las resistencias mecánicas. Se caracterizaron dos cenizas de carbón de la misma génesis, pero con procesos térmicos diferentes, presentándose en ambas, módulos de  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  entre 2,3 y 2,6 se encontró que es viable la activación con Na(OH) a temperaturas entre 8 °C en adelante, indicando que termodinámicamente el proceso es posible, pero con una fuerte influencia de la temperatura en la cinética de reacción. La evolución mineralógica de las pastas de cenizas de carbón activadas, presentaron una alta formación de zeolitas a temperaturas superiores a 18 °C, donde el desarrollo de estas se encuentra ligado a las resistencias mecánicas.

Valencia, Angulo, Robayo y Mejía (2016) CONCRETOS DE ACTIVACION ALCALINA BASADOS EN SUBPRODUCTOS INDUSTRIALES (CENIZAS VOLANTES Y ESCORIAS DE ALTO HORNO) EXPUESTOS A ELEVADAS TEMPERATURAS.

Resumen: Durante los últimos años han surgido diferentes cementantes alternativos, entre estos los denominados de activación alcalina, en los cuales se utilizan como precursores tanto minerales como subproductos industriales. Estos cementantes han mostrado una ventaja comparativa relacionada a su menor afectación ambiental, ahorro de energía y en especial resistencias a la compresión elevadas a edades tempranas. La presente investigación se orienta al diseño y producción de concretos binarios de activación alcalina basados en la mezcla de ceniza volante (FA) y escoria siderúrgica de alto horno (GBFS). La ceniza utilizada corresponde a un residuo de una industria papelera y posee un alto contenido de inquemados (20%). La proporción FA/GBFS fue de 80/20 y se utilizó como activador una mezcla de NaOH y silicato de sodio. Como material de referencia se utilizó un concreto de cemento portland (OPC). Se determinaron la resistencia a la compresión, las propiedades de permeación, y el desempeño a elevadas temperaturas. Los concretos de activación alcalina lograron superar en un 59% la resistencia del concreto OPC a los 7 días de curado. Con respecto a los ensayos de permeación se obtuvo una mayor resistencia a la penetración del agua en el concreto binario. A 1100 °C el concreto FA/GBFS mantiene la integridad y reporta una resistencia residual de 15 MPa, superando ampliamente el de concreto portland convencional (OPC). Palabras Clave: Concretos de Activación alcalina, Cenizas Volantes, Escoria de alto horno, Altas temperaturas.

Lozano (2018) ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y FLEXIÓN EN MORTEROS ACTIVADOS ALCALINAMENTE CON CENIZA VOLANTE SIN LA UTILIZACIÓN DE CEMENTO PORTLAND.

Resumen: Este proyecto principalmente se encuentra basado en la sustitución de cemento hidráulico convencional, por cenizas volantes activadas alcalinamente, en la producción de mortero, donde se permite obtener un producto que cumple con los requerimientos físicos y mecánicos especificados en las normas NTC. Se trabajarán mezclas con cenizas volantes activadas alcalinamente, provenientes de procesos energéticos de la empresa textilera Fabricato, estas serán activadas alcalinamente con Hidróxido de Sodio (NaOH) en diferentes proporciones. De este modo, mediante la evaluación del desempeño mecánico de compresión y flexión, de las diferentes mezclas de mortero con ceniza volante activada alcalinamente, se



pretende dar un paso hacia la implementación de materiales ecológicos de bajo impacto.

Prieto, Montaña, Parra y Puerto (2019) EVALUACIÓN MECÁNICA Y AMBIENTAL DEL USO DE CENIZA VOLANTE CON ACTIVACIÓN ALCALINA COMO ALTERNATIVA DE REEMPLAZO TOTAL DEL CEMENTO EN LA ELABORACIÓN DE TABLETAS PREFABRICADAS.

Resumen: La presente investigación está orientada a la implementación de ceniza volante activada alcalinamente como sustitución total del cemento Portland en la elaboración de tabletas prefabricadas. El programa experimental comprendió la caracterización fisicoquímica de materias primas, hallazgo de la relación óptima activador alcalino/ceniza volante y ensayos mecánicos de resistencia a la compresión y módulo de rotura. Adicionalmente se incluyó un comparativo de la huella de carbono de un lote de tabletas prefabricadas de mortero de cemento Portland y ceniza volante. La activación de ceniza volante se realizó por medio de la combinación de activadores alcalinos compuestos por NaOH y Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>. Los resultados demostraron que los morteros de ceniza volante presentan buenas propiedades mecánicas y viabilidad ambiental en términos de huella de carbono. La ceniza volante puede ser acogida en la industria de tabletas prefabricadas como opción de menor impacto ambiental con óptimas resistencias a la compresión y módulo de rotura.

Guzmán (2014) ESTUDIOS DE LAS PROPIEDADES DE LOS MORTEROS QUE EMPLEAN ALTAS DOSIS DE CENIZAS VOLANTES ACTIVADAS ALCALINAMENTE.

Resumen: El cemento Portland es el material de construcción más comúnmente utilizado a través del mundo. Sin embargo, es conocido que éste produce un efecto significativamente negativo sobre el ambiente. Por tal razón, se estudian alternativas disponibles con el fin de reducir los efectos de la industria cementera reduciendo la dosis de cemento utilizada en la industria de la construcción. Se estudió el comportamiento mecánico y de durabilidad de mezclas que contienen altas (HVFA) dosis de cenizas volantes Tipo F activadas alcalinamente (AAFA) con hidróxido de sodio (NaOH). Para este estudio, se fabricaron mezclas de mortero para ser empleadas en albañilería y terminación de paredes, con sustitución parcial de 0% a 75% de cemento Portland Tipo I por cenizas volantes tipo F. En morteros que emplearon altas dosis de cenizas volantes sin activador (HVFA) y los que tienen 100% de cemento Portland Tipo I por cenizas volantes Tipo F. En morteros que emplearon altas dosis de cenizas volantes

activados alcalinamente (AAFA) resultaron ser menos resistentes a cargas en compresión que los morteros que contienen altas dosis de cenizas volantes sin activador (HVFA) y los que tienen 100% de cemento Pórtland. Los morteros con HVFA presentaron expansiones menores comparado con morteros con 100% de cemento Pórtland y morteros AAFA. También, los morteros con HVFA estudiados presentaron igual o mejor comportamiento en términos de durabilidad. En general, bajo las condiciones estudiadas en este proyecto, se pudo determinar que el uso del activador no es necesario para obtener una mezcla de mortero con un comportamiento importante que puede ayudar a reducir la dosis de cemento Pórtland y que ayuda a aumentar el uso de cenizas volantes. En conclusión, los resultados obtenidos por medio de este estudio permiten obtener mayor información para otros estudios sobre morteros con altas dosis de cenizas volantes, para ser empleados en albañilería y terminación de paredes utilizando materia prima disponible en el mercado local.

García (2016) UTILIZACIÓN DE RESIDUOS VITREOS EN LA PREPARACIÓN DE PASTAS Y MORTEROS DE CENIZAS VOLANTES ACTIVADAS ALCALINAMENTE, COMPORTAMIENTO REOLÓGICO Y MECÁNICO.

ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y A FLEXIÓN EN MORTEROS ELABORADOS CON GEOPOLÍMEROS A BASE DE CENIZA VOLANTE Y METACAOLÍN ACTIVADOS ALCALINAMENTE.

Resumen: En el presente trabajo de grado, se analizó el comportamiento de las resistencias a compresión y a flexión en morteros geopoliméricos a base de Ceniza Volante (CV) y Metacaolín (MK) como uso alternativo al cemento Pórtland (CP), para ello fue necesario realizar la caracterización de la materia prima. A la CV procedente de la termoeléctrica TERMOPAIPA, se le realizó en la Universidad Nacional de Colombia el ensayo de Fluorescencia de Rayos X (FRX) para determinar la clase de CV que se tenía, la cual se clasificó mediante la NTC 3493 como CV Tipo F; la caracterización del MK fue suministrada por la empresa comercializadora KAOLIN S.A.S. donde en su composición no se evidencia contenido de calcio. Posteriormente, se realizaron mezclas piloto de pastas con los precursores activados alcalinamente con hidróxido de sodio (NaOH) y silicato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) donde se evidenció que al mezclar una mayor cantidad de  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  y en menor y a

baja concentración molar el NaOH la resistencia a la compresión tiende a aumentar, llegado a lo anterior, se realiza los cubos de mortero de acuerdo a la NTC 220, allí se encuentra un diseño de mezcla óptimo en función de la concentración de Na<sub>2</sub>O, la cual fue del 12% analizada en laboratorio, esta mezcla óptima está basada en 95% CV – 5% MK activados alcalinamente, con Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> e NaOH con concentración de 4 mol, como material cementante, dando resistencias a 28 días de 13,8 MPa, pero al comparar dicha resistencia con la obtenida por el CP, ésta es inferior en un 50%; con la mezcla óptima obtenida se elaboran las viguetas de mortero de acuerdo a la INV-E 324, una vez falladas a flexión se evidencio que a temprana edad su resistencia está por encima de las obtenidas por el CP pero al cabo de los 28 días la resistencia de la mezcla óptima decae en un 62% y se encuentra por debajo del CP. Finalmente, se concluye que la mezcla obtenida en laboratorio no se recomienda como uso alternativo al CP debido a que las resistencias alcanzadas no superan las expuestas por la NTC 121, donde estipula que a los 28 días debe alcanzar una resistencia mínima de 24 MPa.

#### OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES CEMENTADOS A BASE DE CENIZAS VOLANTES COMO USO ALTERNATIVO DEL CEMENTO PORTLAND.

##### Resumen:

El desequilibrio actual de la industria del cemento portland, ha conllevado a la búsqueda de materiales alternativos que integren parámetros competentes en su desarrollo, logrando obtener así materiales con un elevado rendimiento, bajos costos y un menor impacto ambiental; dando lugar a los denominados geopolímeros. Con el objetivo de estudiar la factibilidad del uso de la puzolana natural existente en la Región Andina de Colombia como fuente de aluminosilicatos en la síntesis de un material cementante, el presente documento consiste en la evaluación de un concreto a base de cenizas de carbón, que determina la composición química y estima las propiedades físicas como la resistencia mecánica, la trabajabilidad y maleabilidad del material, así como también plantea un análisis comparativo entre el espécimen y el concreto convencional. Para tal propósito, se llevó a cabo la caracterización del material a partir de ensayos, cuyos resultados revelan que, si es utilizada como fuente de aluminosilicatos pura, no se logra activar, para lo cual se estudia entonces la incorporación de cantidades considerables de fuentes como, óxido de calcio, que influyo en el alcance del 30% de la resistencia. Por lo tanto, en las proporciones estudiadas no sería

viable el uso de geopolímeros, no obstante, es el principio de un amplio estudio que a futuro podría representar una buena oportunidad para el sector de la construcción.

## EVALUACIÓN MECÁNICA Y AMBIENTAL DEL USO DE CENIZA VOLANTE CON ACTIVACIÓN ALCALINA COMO ALTERNATIVA DE REEMPLAZO TOTAL DEL CEMENTO EN LA ELABORACIÓN DE TABLETAS PREFABRICADAS

Resumen: La presente investigación está orientada a la implementación de ceniza volante activada alcalinamente como sustitución total del cemento Portland en la elaboración de tabletas prefabricadas. El programa experimental comprendió la caracterización fisicoquímica de materias primas, hallazgo de la relación óptima activador alcalino/ceniza volante y ensayos mecánicos de resistencia a la compresión y módulo de rotura, adicionalmente se incluyó un comparativo de la huella de carbono de un lote de tabletas prefabricadas de mortero de cemento Portland y ceniza volante. La activación de ceniza volante se realizó por medio de la combinación de activadores alcalinos compuestos por NaOH y Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>. Los resultados obtenidos demostraron que los morteros de ceniza volante presentan buenas propiedades mecánicas y viabilidad ambiental en términos de huella de carbono. La ceniza volante puede ser acogida en la industria de tabletas prefabricadas como opción de menor impacto ambiental con óptimas resistencias a la compresión y módulo de rotura

## 8. ANALISIS BIBLIOGRAFICO

A continuación, se realiza un resumen de los pasos seguidos por diversos autores para la realización de mezclas de mortero de ceniza volante activada alcalinamente, donde nos enfocaremos en el uso de activadores, las proporciones del material dentro de la mezcla y las propiedades de cada uno.

Los diseños seleccionados cumplen con los criterios establecidos por la norma ASTM C-618-12, 2014, donde queda especificado que los contenidos de hierro, óxido de sílice y aluminio, dentro de la ceniza volante, deben estar por encima del 70%.

**Autor 1:** Ing. Arnold G. Gutiérrez

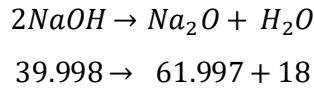
**Tema:** Obtención y caracterización de geopolímeros sintetizados a partir de la escoria granulada de alto horno como uso alternativo al cemento portland (Tesis).

**Desarrollo:** En este trabajo con orientación experimental el autor define, inicialmente, tres tipos de mezcla de mortero de ceniza volante usando dos activadores alcalinos, en el primer grupo se elabora una mezcla con hidróxido de sodio, en el segundo grupo la preparación se realiza con silicato de sodio y para finalizar se realiza una mezcla con la combinación de ambos.

Para empezar, se preparan las diferentes disoluciones de activantes alcalinos en agua destilada en donde se destaca la reacción exotérmica del hidróxido de sodio al 98%, con una concentración molar de 8, que obliga a tomar como medida planear su realización con 24 horas de antelación, caso contrario ocurre con el silicato que puede ser agregado directamente a la mezcla.

El siguiente paso que describe el autor en su método es establecer las relaciones de activador alcalino/ceniza volante, para ello selecciona valores entre 0,4 y 0,5 y prosigue definiendo la dosificación para cada activador: para el caso del hidróxido de sodio se busca determinar la cantidad de masa de óxido de sodio requerida partiendo de valores conocidos como lo son la cantidad de material cementante y la concentración en porcentaje del óxido de sodio.

Haciendo uso de una relación estequiométrica entre el óxido de sodio y el hidróxido de sodio con sus correspondientes pesos moleculares:



A partir de esta relación se encuentra la cantidad de hidróxido de sodio necesaria para una concentración determinada.

El paso siguiente es determinar mediante la relación AA/CV la cantidad de agua requerida para la solución, esto sin tener en cuenta el agua presente en el hidróxido de sodio. Para la activación de 4% en peso de óxido de sodio ( $Na_2O$ ) 1000g de material cementante se tiene que:

$$1000g(cv) * 0.04 = 40g \text{ de } Na_2O$$

Correspondiente a la cantidad de masa de óxido de sodio, se procede con los datos obtenidos a determinar la cantidad de hidróxido de sodio:

$$40g(Na_2O) * \frac{39.981 * 2gNaOH}{61,997gNa_2O} = 51.59g NaOH$$

Para la dosificación de silicato de sodio se repite la misma secuencia, con la diferencia de que al presentarse en forma líquida se requiere de la densidad de este para posteriormente calcular su volumen.

En la última mezcla donde se usan los dos activadores el autor señala que al usar estos dos activadores se busca modificar el módulo del silicato que se define como la relación entre el dióxido de silicio/óxido de sodio, al tener un módulo definido el silicato puede verse afectado por el óxido de sodio pues ambos mantienen una relación inversamente proporcional, de esta forma para disminuir el módulo se agrega hidróxido de sodio y para aumentarlo sílice activa.

Para finalizar el autor propone el siguiente ejemplo:

Se desea una concentración de 5.5% de óxido de sodio ( $Na_2O$ ) en masa de material cementante la cual son 1000g, por lo tanto, al multiplicar estos dos valores obtenemos la masa del óxido de sodio la cual es de 55g. Adicional a esto se tiene que se necesita un módulo de

0.75, por lo tanto la relación dióxido de silicio/óxido de sodio es igual a 0.75, al multiplicar masa por el módulo tenemos que la cantidad de óxido de silicio que debe estar en la solución es de 41.25g, al ser el silicato de sodio el único aportante de dióxido de silicio es el silicato de sodio debemos fijarnos en la ficha técnica:

Densidad=1.5263g/cm<sup>3</sup>

SiO<sub>2</sub>=31.2%

Na<sub>2</sub>O=12.7%

H<sub>2</sub>O = 56.1%

Aplicando regla de tres obtenemos la cantidad de silicato de sodio la cual es igual a 132.21g, al despejarla de su densidad obtenemos que su volumen es de 86.62ml, acto seguido se calcula la cantidad de óxido de sodio que es aportada por el silicato, a partir de los datos obtenidos se tiene que el aporte de óxido de sodio es de 16.8g, al restarlos de los 55g estimados al comienzo encontramos un faltante de 16.8g los cuales deben ser aportados por la solución de hidróxido 8 molar preparada con antelación. Realizando de nuevo la relación estequiométrica se tiene que los 38.2g de óxido de sodio corresponden a 49.29g de hidróxido de sodio, como la solución 8 molar tiene 320g de hidróxido de sodio por litro, se calcula el volumen en mililitro de la solución 8 molar que proporciona los 49.29g de hidróxido de sodio, esto corresponde a 0.154L, luego pasamos a calcular el contenido de agua necesaria. Al asumir la relación agua cemento como 0,4 tendremos que la cantidad de agua necesaria es de 400ml, a esta cantidad se le deben descontar los contenidos de agua presentes en el silicato de sodio, la solución de hidróxido 8 molar y el hidróxido de sodio. En el caso del hidróxido de sodio se calcula el contenido de agua por medio de la relación estequiométrica, el silicato por su parte aporta su ficha técnica y en la solución de hidróxido de sodio 8 molar partimos de la densidad y le restamos la masa del óxido de sodio en la solución, en este caso el resultado es (49.29g). el agua a adicionar es:

$$cont\ H_2O = 400ml - 11.1mlNaOH - 74.17mlNa_2SiO_3 - 135g(sol\ m) = 179.23ml$$

El diseño de mezcla queda de la siguiente manera:

En una concentración de 5.5% de óxido de sodio en peso de material cementante se requieren: 1000g de material cementante, 2700gr de arena, 86.62ml de silicato de sodio, 154 ml de solución de hidróxido de sodio 8 molar y 179.23ml de agua.

Como dato adicional se aportó la fluidez obtenida para las mezclas según el activador usado, estos valores nos muestran que tan trabajable puede ser una mezcla. En el caso del silicato de sodio, la viscosidad propia del activador aumenta la cohesión entre las partículas del material cementante, lo que puede dificultar su uso en obra.

**Tabla 8:**

*Fluidez de Mezclas Activadas Alcalinamente.*

ACTIVADOR	NaOH	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> + NaOH
FLUIDEZ %	34	18	13

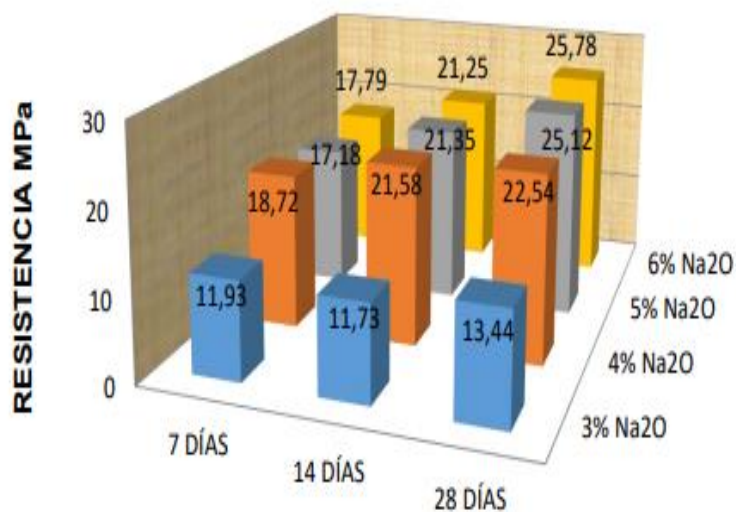
*Fuente: (GUTIÉRREZ, 2017)*

### **Análisis de resultados:**

En cuanto a las pruebas de laboratorio el autor desarrollo ensayos con mezclas en las cuales variaba la relación activadora alcalino (hidróxido de sodio) y material cementante (AA/C), variando la concentración de solución del activador en valores entre en 3 y 10 porciento, sometiéndolas a pruebas de resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 dias. De igual forma se usó silicato de sodio el cual debido a sus propiedades fisicoquímicas hace necesario someterlo a una temperatura constante, en este caso el autor aplico 50°C durante un periodo de 24 horas con el fin de acelerar la activación del material cementante, es importante resaltar que en gran parte de la literatura consultada se repite dicho proceso, con ligeras variaciones.



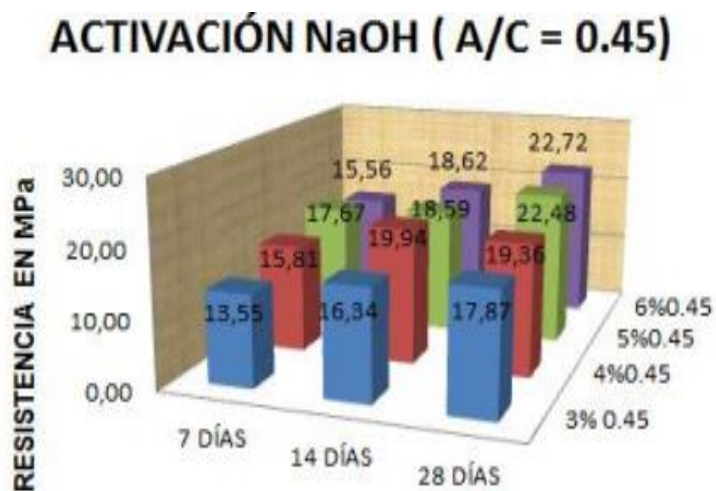
**Gráfico 1:** Resistencia a la Compresión de Morteros Activados con NaOH, Relación aa/cv 0,4.



Fuente: (Gutiérrez, 2017)

Para una relación activador/cementante (hidróxido de sodio/ceniza volante) de 0,4, las resistencias más elevadas se alcanzaron a los 28 días en niveles de concentración del activador entre el 5% y 6%.

**Gráfico 2:** Resistencia a la Compresión de Morteros Activados con NaOH, Relación aa/cv 0,45.



Fuente:(GUTIÉRREZ, 2017)

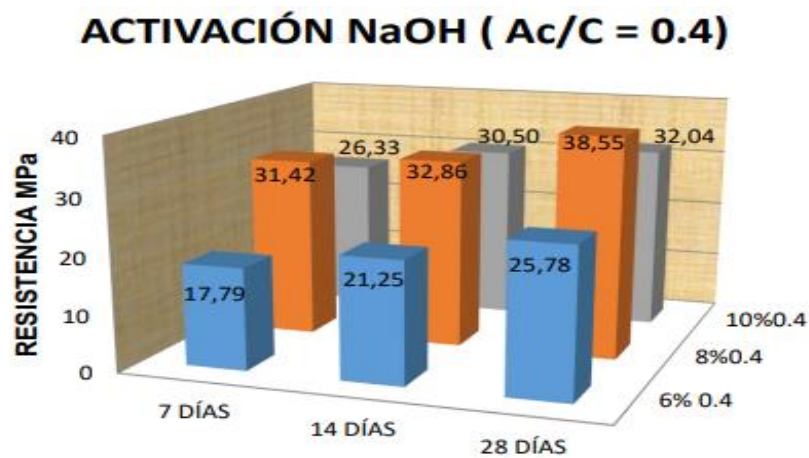
**Gráfico 3:** Resistencia a la Compresión de Morteros Activados con NaOH, Relación aa/cv 0.5.



Fuente:(Gutiérrez, 2017)

Tal como se demuestra en las gráficas 2 y 3, al aumentar la proporción AA/CV se produjo la disminución en la resistencia a la compresión para cada una de las mezclas sin importar la concentración del activador, a partir de este punto es claro que la relación AA/CV que mejores condiciones mecánicas presenta es la de 0,4. A continuación se muestra la variación de acuerdo al incremento en la concentración del activador alcalino en valores entre el 6% y 10%.

**Gráfico 4:** Resistencia a la Compresión de Morteros Activados con NaOH, Relación aa/cv 0,4 Concentración 6-10.



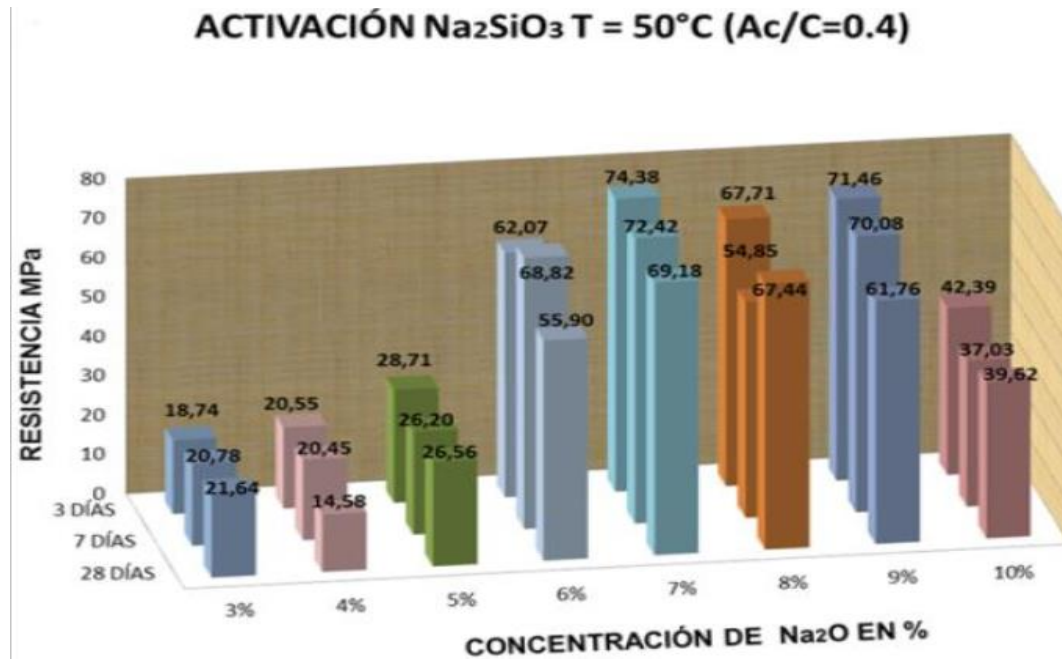
Fuente:(Gutiérrez, 2017)

Al ser incrementada la concentración del activador se puede notar que los valores correspondientes a la resistencia a la compresión aumentan, esto concuerda con el principio que expresa que una mayor concentración de activador facilita la solubilidad del material cementante, permitiendo el aumento de la resistencia de la mezcla. En el caso del hidróxido de sodio, los valores más altos se presentan cuando su concentración está en niveles cercanos al 8%, después de este punto la resistencia a la compresión se reduce considerablemente.

El autor resalta, como dato a considerar, que el hidróxido de sodio se encuentra en estado sólido en forma de pellets, por lo tanto para agregarlo a la mezcla es necesario prepararlo en solución, el inconveniente que presenta es que al entrar en contacto con el agua se produce una reacción exotérmica, por lo cual la solución debe prepararse con antelación para garantizar que esta esté a temperatura ambiente al momento de usarla, recordando que la activación del material cementante con hidróxido de sodio no necesita aplicación de calor externo, como si lo necesita el silicato de sodio, en este caso el calor generado puede tener la capacidad de afectar las propiedades mecánicas de la mezcla.

En la siguiente grafica se describe el comportamiento de la mezcla en la que se incorporó silicato de sodio como activador alcalino, esta mezcla necesita ser sometida a una temperatura de 50°C durante 24 horas para lograr acelerar el proceso de activación, recordando que el silicato de sodio es un líquido viscoso que, si bien mejora la cohesión de las partículas, presenta un tiempo de activación más lento.

**Gráfico 5:** Resistencia a la Compresión de Morteros Activados con  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , Relación aa/cv 0,4 Concentración 3-10%.

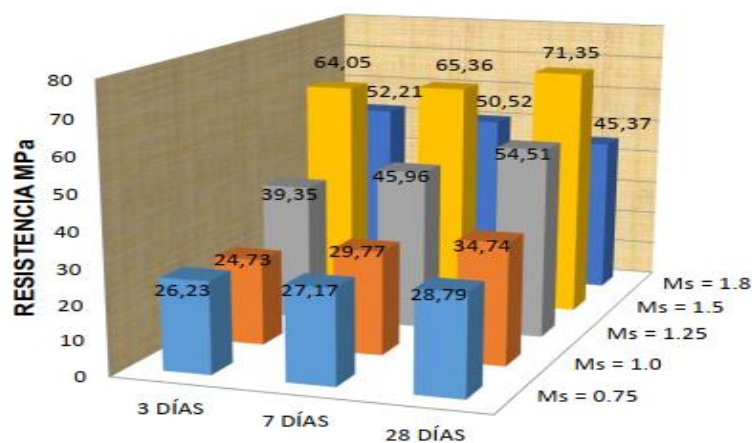


Fuente: (Gutiérrez, 2017)

Adicionalmente el calor aportado a la mezcla mejora la estructura de la misma (Wang, Srieveer & Pratt, 1994), tal como se aprecia, los valores correspondientes a la resistencia a la compresión a partir del 6% de concentración del activador prácticamente duplican los valores obtenidos con el hidróxido de sodio. De igual forma se puede comprobar principios mencionados por otros autores como Fernández, Jiménez & Puertas, 1997, quienes afirman que hay concentraciones óptimas dependiendo el agente activante.

Considerando que el módulo del silicato tiene una relación directa en el desempeño de la mezcla, el autor plantea el desarrollo de una prueba a la mezcla de mortero con una concentración de 5,5% de silicato de sodio en donde varia su modulo entre los 0,75 y los 1.8 teniendo en cuenta que los valores óptimos para este se encuentran entre 1 y 1,5 (Fernandez-Jimenez, et al, 2003), los resultados son los siguientes:

**Gráfico6:** *Activación Modificando el Módulo del Silicato Entre 0,75 y 1,8.*

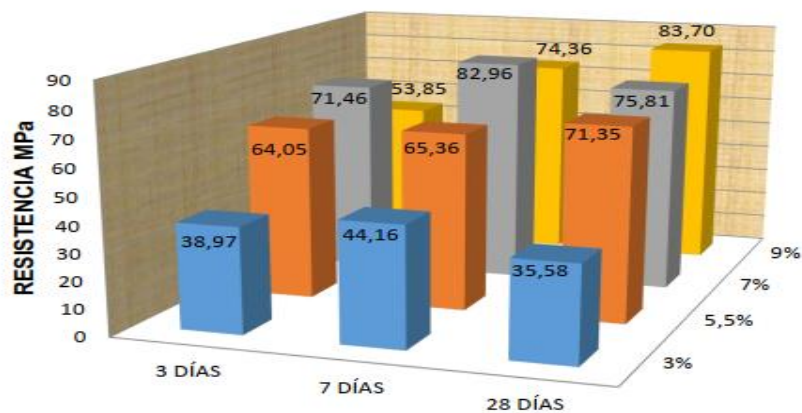


Fuente: (Gutiérrez, 2017)

En el ensayo desarrollado por el autor se puede comprobar que el módulo óptimo para el silicato de sodio es de 1.5. Acto seguido se verifica la concentración óptima para dicho módulo:

**Gráfico7:** *Activación con  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  con Diferente Concentración.*

**ACTIVACIÓN CON DIFERENTE CONCENTRACIÓN Y  
MÓDULO DE 1.5**

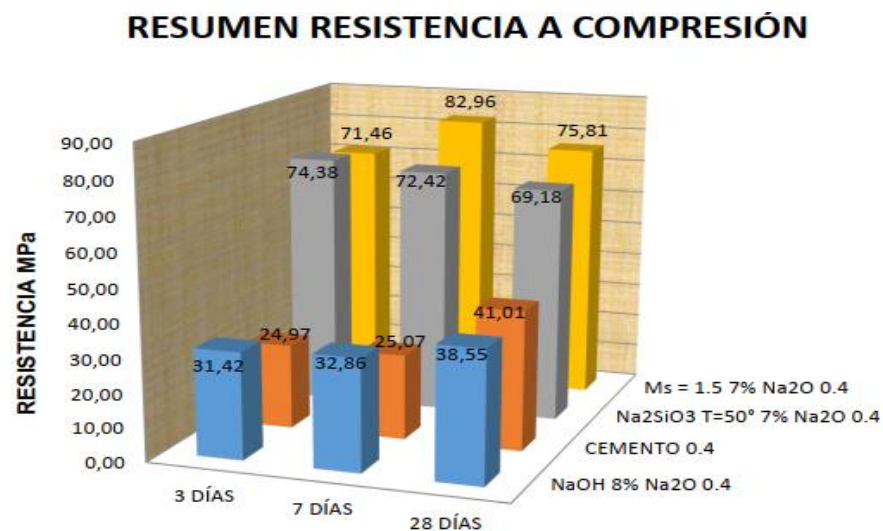


Fuente: (Gutiérrez, 2017)

Según lo observado la concentración que mejores resultados presentó fue de 7% debido a sus altas resistencias tempranas, esto, a pesar de que se observa mejor resistencia a la compresión en la concentración del 9% a los 28 días, donde la concentración del 7% presenta un descenso respecto a los valores presentados a los 14 días.

A continuación, se presenta en detalle el resumen de los ensayos en los que se obtuvo mejor desempeño:

**Gráfico8:** *Resumen de Resultados, Resistencia a la Compresión.*



Fuente: (Gutiérrez, 2017)

Como se venía mostrando, el silicato de sodio en una concentración del 7% y un módulo de 1,5, presenta el mejor comportamiento de todas las combinaciones ensayadas. En cuanto a si es la configuración indicada, la variedad de ensayos realizados nos permite elegir las condiciones que más se adapten a nuestras necesidades.

**Conclusiones:** A pesar de que ambos activadores presentan buen desempeño, superando propiedades mecánicas para mezclas de morteros CPO, se debe tener en cuenta que el primer reto se encuentra en la trabajabilidad de los mismos, pues es innegable que hay factores a

tener en cuenta, como los tiempos de activación, los cuales, pueden llegar a dificultar su uso en obra. En el caso del hidróxido de sodio el autor establece tiempos de fraguado entre los 110 – 160 minutos. Para el silicato de sodio los tiempos fueron significativamente mayores, pues a pesar de que el autor indica en una de sus referencias que este está entre los 10 y los 30 minutos, hace la aclaración que tras 48 horas las probetas que contenían la mezcla con este activador no habían fraguado, por lo que se vio en la necesidad de ingresarlas al horno por 24 horas a 50°C. en este caso el autor sugiere otros estudios con los que se pueda establecer, con certeza, los tiempos de fraguado.

Otro punto a destacar tiene que ver con los valores máximos alcanzados por el autor pues autores como Wang señalan que estos valores máximos para mezclas de mortero activadas alcalinamente con silicato de sodio pueden estar cercanas a los 120 Megapascals, de cualquier forma, supera por mucho los 21 Megapascals que usualmente pueden encontrarse en obra, lo cual demuestra el alto desempeño de las mezclas activadas.

Para finalizar, gracias a la variedad de ensayos aplicados, el autor nos muestra las múltiples configuraciones de las cuales podemos disponer a la hora de implementar las mezclas activadas en la ejecución de un proyecto, pues, al final dependerá directamente de nuestras necesidades y el factor económico.

**Autor 2:** Jeferson Norvey Lozano Lozano.

**Tema:** Análisis de la resistencia a la compresión y flexión en morteros activados alcalinamente con ceniza volante sin la utilización de cemento portland.

**Desarrollo:** En este documento el autor presenta los resultados obtenidos mediante experimentación, en la búsqueda de las proporciones de mezcla ideales para morteros de ceniza volante activada alcalinamente, para ello hace uso del hidróxido de sodio como agente activador, en el desarrollo de la experiencia el autor usa dicho activador con dos molaridades diferentes (6M y 8M), adicional prepara una mezcla de control elaborada con cemento portland en una proporción agua/material cementante de 0,4.

Los pasos detallados para la elaboración de las mezclas son los siguientes:

- Se realiza la dosificación del hidróxido de sodio para obtener molaridades de 6M y 8M.
- Se tamiza la ceniza para obtener granulometría y finura.
- Se realiza el diseño de mezcla de mortero tomando como parámetro la norma I.N.V.E 323-07.
- Se mezclan los elementos en la mezcladora y se elaboran las probetas.
- Se realiza el curado de las mezclas en horno a 60°C en un periodo de 24 horas.
- Se realizan pruebas de resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días.

El primer paso consta en realizar la solución del activador el cual viene en presentación sólida en forma de pellets, la adquisición del mismo se realizó en Químicos Campota ubicado en la ciudad de Bogotá. Teniendo en cuenta que la masa molar del NaOH es de 39.997 g/mol se procede a preparar la solución en un litro de agua destilada de la siguiente forma:

$$6 \text{ mol} * 39,997 \text{ g/mol} \approx 240 \text{ gramos de NaOH.}$$

$$8 \text{ mol} * 39,997 \text{ g/mol} \approx 320 \text{ gramos de NaOH.}$$

Estos son los valores agregados al litro de agua destilada.

Para la elaboración del diseño el autor parte de la relación activador alcalino / material cementante (AA/CV), de 0,4. Parte del uso de 1000g de ceniza volante, por lo tanto, al multiplicar por este factor obtiene que la cantidad de hidróxido de sodio a usar es de 400ml. Luego tomando como referencia la norma I.N.V.E 323-07 para cementos hidráulicos, se define la cantidad de arena, recordando que para morteros normales se recomienda una proporción material cementante/Arena de 1-2,75. Para este caso serían 2750g de arena N°30.

Luego de mezclar cada uno de los precursores se procede a la elaboración de las probetas las cuales son cubos de 50mm X 50mm las cuales son sometidas a vibración y posteriormente ingresadas al horno a una temperatura de 60°C, con el fin de garantizar el curado de la mezcla.



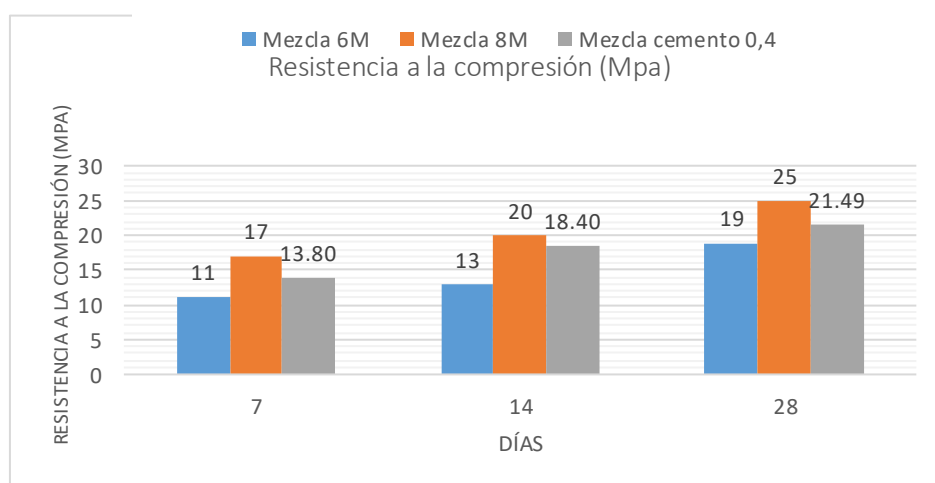
En total se elaboraron 81 probetas, 9 para cada uno de los tres tipos de mezcla (6M,8M & Control), para ser ensayadas a los 7, 14, y 28 días. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

**Tabla 9: Resultados Pruebas de Resistencia a la Compresión.**

Variables		Mezcla 1 Ceniza volante activada con NaOH 6M a 60°C		Mezcla 2 Ceniza volante activada con NaOH 8M a 60°C		Mezcla de Cemento Cemento portland activado con 0.4% de agua a 60°C	
Días	Muestra	Fuerza (KN)	Esfuerzo (MPa)	Fuerza (KN)2	Esfuerzo (MPa)3	Fuerza (KN)4	Esfuerzo (MPa)5
7	1	31.10	12.40	43.80	17.50	33.80	13.50
	2	23.50	9.40	42.00	16.80	37.00	14.80
	3	28.50	11.40	43.70	17.40	33.50	13.40
	4	28.10	11.20	41.50	16.50	33.00	13.20
	5	24.30	9.70	40.80	16.30	36.50	14.60
	6	30.80	12.30	43.80	17.50	32.80	13.10
	7	30.30	12.10	40.50	16.20	34.00	13.60
	8	24.00	9.60	41.30	16.90	36.30	14.50
	9	30.50	12.20	44.00	17.60	34.50	13.80
14	1	33.80	13.50	51.30	20.50	48.80	19.50
	2	32.00	12.80	49.50	19.80	46.80	18.70
	3	33.50	13.40	48.50	19.40	48.50	19.40
	4	30.50	12.20	51.50	20.60	48.30	19.30
	5	33.30	13.30	48.00	19.20	48.00	19.20
	6	31.80	12.70	50.50	20.20	46.30	18.50
	7	31.00	12.40	48.80	19.50	46.50	18.60
	8	32.90	13.10	49.30	19.70	47.80	19.10
	9	31.50	12.60	50.30	20.10	46.00	18.40
28	1	48.30	19.30	63.50	25.40	53.50	21.40
	2	47.00	18.80	63.30	25.30	50.80	20.30
	3	46.00	18.40	61.10	24.40	56.00	22.40
	4	46.80	18.70	64.00	25.60	53.00	21.20
	5	48.00	19.20	60.80	24.30	51.00	20.40
	6	48.50	19.40	63.30	25.30	56.30	22.50
	7	46.30	18.50	61.10	24.40	53.10	21.30
	8	48.00	19.20	62.50	25.00	53.80	21.50
	9	46.5	18.6	60.5	24.2	56	22.4

Fuente: (Lozano, Análisis de la resistencia a la compresión y flexión en morteros activados alcalinamente con ceniza volante sin la utilización de cemento portland., 2017)

**Gráfico9:** *Resumen de Ensayo de Resistencia a la Compresión.*



Fuente: (Lozano, Análisis de la resistencia a la compresión y flexión en morteros activados alcalinamente con ceniza volante sin la utilización de cemento portland., 2017)

Como podemos observar, en el comportamiento descrito en la gráfica la mezcla de activación alcalina preparada con una solución de activador de 8 molar presento un mejor comportamiento respecto a las otras dos mezclas, a pesar de ser superior es importante resaltar que el valor máximo alcanzado está muy por debajo de los valores estimados para resistencia a la compresión dada por autores como Wang, (1994) para mezclas de morteros de activación alcalina los cuales se ubican en un rango entre los 40 y 120 Megapascuales.

**Conclusiones:** a pesar de que los resultados obtenidos en la experiencia no se acercan a los valores reflejados en otras literaturas, el desarrollo de la practica nos muestra que las mesclas si tienen la capacidad de ser trabajadas en un ambiente controlado y que los valores de la resistencia a la compresión son aceptables y comparables a los obtenidos con mezclas de mortero convencional.

Por otro lado, los resultados nos enseñan que hay una relación directa entre la concentración molar del hidróxido de sodio y la resistencia a la compresión por lo que sería recomendable verificar la concentración molar óptima para una mezcla de mortero activada con este precursor.

**Autor 3:** Laura C. Prieto, Andrés A. Montaña, Alejandro Parra & Julián D. Puerto-Suárez.

**Tema:** Evaluación Mecánica y Ambiental del Uso de Ceniza Volante con Activación Alcalina como Alternativa de Reemplazo Total del Cemento en la Elaboración de Tabletillas Prefabricadas.

**Desarrollo:** En este trabajo de investigación los autores se centran en la búsqueda de la configuración ideal para elaborar una mezcla de activación alcalina a base de ceniza volante tipo F, la cual fue obtenida de la termoeléctrica Termozipa, ubicada en Zipaquirá. Dicha mezcla se usará en la elaboración de elementos prefabricados.

Como punto primordial se destaca la búsqueda de la proporción ideal entre el activador alcalino seleccionado, silicato de sodio mezclado con hidróxido de sodio a diferentes molaridades, y la ceniza volante como material cementante. Adicionalmente se preparó una mezcla de mortero con CPO con el fin de realizar las comparaciones pertinentes de acuerdo con el desempeño de las muestras.

Los pasos descritos por los autores son los siguientes:

- Elaboración de mortero de prueba con CPO
- Elaboración de mezclas activadas alcalinamente a diferentes molaridades.
- Determinación de la fluidez de las mezclas.
- Determinación de la resistencia a la compresión.

Para la elaboración de la muestra con CPO los autores siguen las recomendaciones establecidas en la norma ASTM C109M, en la cual se recomienda una relación material cementante/Arena de 1/2.75. la relación agua cemento se determina mediante prueba de fluidez obteniendo un valor de 0,48. Luego de realizar la mezcla se dispuso en moldes de 0,5 m<sup>3</sup> a los cuales se les incorporo la mezcla en dos capas y se los golpeo 32 veces con el fin de extraer el aire atrapado. Posteriormente se retiran los moldes a un lugar con las condiciones necesarias para realizar el curado del mismo y luego ser ensayados a los 7, 14 y 28 días.

Para el caso de las mezclas de activación alcalina los autores realizaron diferentes combinaciones a fin de hallar la proporción que presentara mejores cualidades mecánicas,

adicionalmente, se expuso las mezclas alcalinas a diferentes condiciones de curado, por un lado, se realizó curado con inducción de calor de 80°C por 24 horas y por otro lado se realizó el curado a temperatura ambiente para posteriormente realizar los ensayos de resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días.

Como se mencionó anteriormente el activador alcalino seleccionado para la elaboración de las mezclas fue una combinación entre silicato de sodio e hidróxido de sodio, este último se preparó en solución, con antelación de un día debido a la reacción exotérmica propia ya antes mencionada. El hidróxido de sodio se preparó en agua destilada a diferentes molaridades, específicamente a razón de 8, 10 y 12 molar. Por otro lado, al igual que la mezcla de control, las mezclas de activación alcalina se prepararon según las consideraciones de la norma ASTM C109M, de esta forma la relación MC (ceniza volante) / Arena se establece como 1 / 2.75. La relación activadora alcalino/material cementante (AA/CV) para el desarrollo de la práctica se dispuso en valores entre 0.4 y 0.6. la proporción silicato de sodio / Hidróxido de sodio se dispuso entre 1 y 2.5. Después de elaborar cada mezcla se dispusieron 576 muestras en moldes de 0.005m<sup>3</sup> para la realización del ensayo de resistencia a la compresión, estas fueron dispuestas de la siguiente forma:

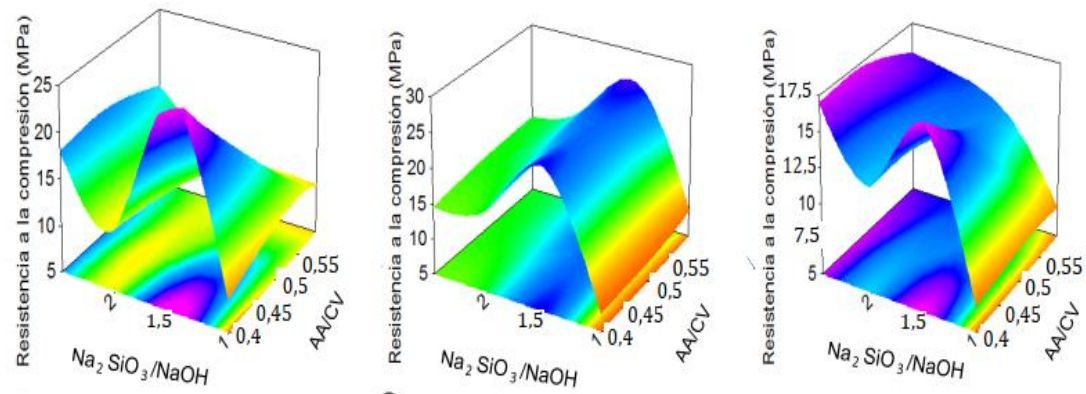
**Tabla 10:** *Distribución de Mezclas de Activación Alcalina.*

Muestra	Activador alcalino / ceniza volante	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> / NaOH
G1	0,40	1
G2	0,45	
G3	0,50	
G4	0,60	
G5	0,40	1,50
G6	0,45	
G7	0,50	
G8	0,60	
G9	0,40	2
G10	0,45	
G11	0,50	
G12	0,60	
G13	0,40	2,50
G14	0,45	
G15	0,50	
G16	0,60	

Fuente: (Prieto, Montano, Parra, & Puerto, 2019)

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para las pruebas de compresión para las diferentes combinaciones seleccionadas por los autores. De izquierda a derecha se presentan los resultados para la solución de NaOH a 8, 10 y 12 molar.

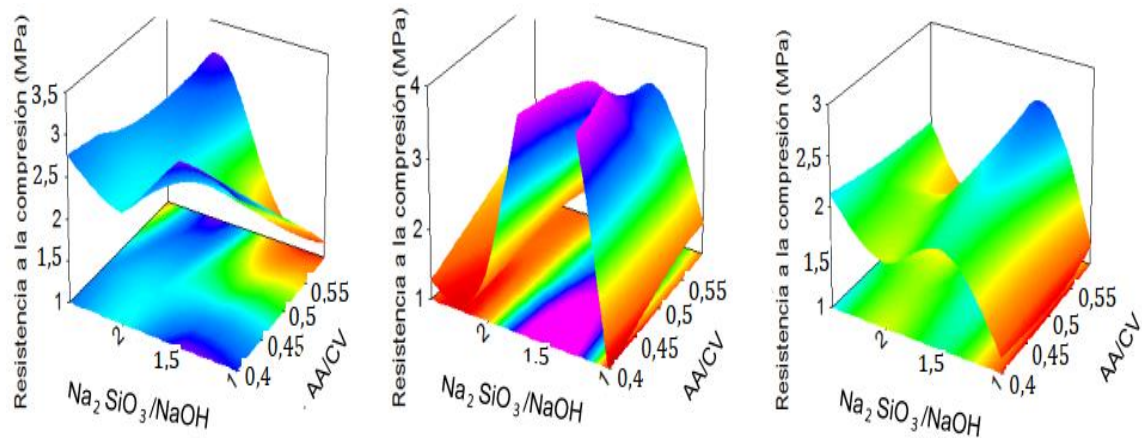
**Gráfico 10:** *Mezclas de Mortero Activado Alcalinamente Curadas a una Temperatura de 80°C Durante 24 Horas.*



Fuente: (Prieto, Montano, Parra, & Puerto, 2019)

Para las mezclas curadas a 80°C durante 24 horas, se observa que las mejores prestaciones en cuanto a resistencia a la compresión se dan en el grupo donde la molaridad de NaOH es igual a ocho, la proporción Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH en 1.5 y la relación AA/CV en los valores de 0.4 y 0.5. Tal como lo podemos notar, esta configuración alcanza, a las 24 horas de curado en horno, una resistencia de 24.46 MPa, misma que un mortero de CPO tardaría comúnmente 14 días en alcanzar. Adicionalmente este valor cumple con la norma NTC 4992, 2004 la cual establece las condiciones para la elaboración de elementos prefabricados (losetas de concreto). A continuación se muestran los resultados de las muestras curadas a temperatura ambiente, para ello las muestras fueron ubicadas en un lugar con condiciones de humedad adecuada y se realizó la protección de las muestras con plástico para evitar la pérdida de la humedad.

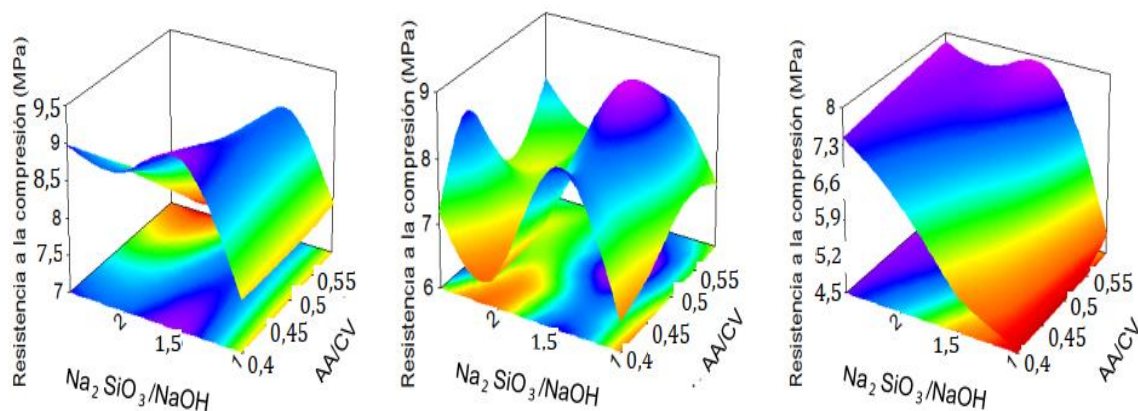
**Gráfico 11:** Mezclas de mortero activado alcalinamente curadas 7 días a temperatura ambiente.



Fuente: (Prieto, Montano, Parra, & Puerto, 2019)

En el curado a temperatura ambiente se puede notar, tal como se muestra en la literatura, que el proceso de curado es significativamente más lento, esto lo podemos deducir ya que al comparar los resultados de la mezcla de mortero activada frente a una mezcla de mortero CPO, las resistencias son muy bajas, y más aún si comparamos con las mezclas que fueron curadas en el horno durante 24 horas.

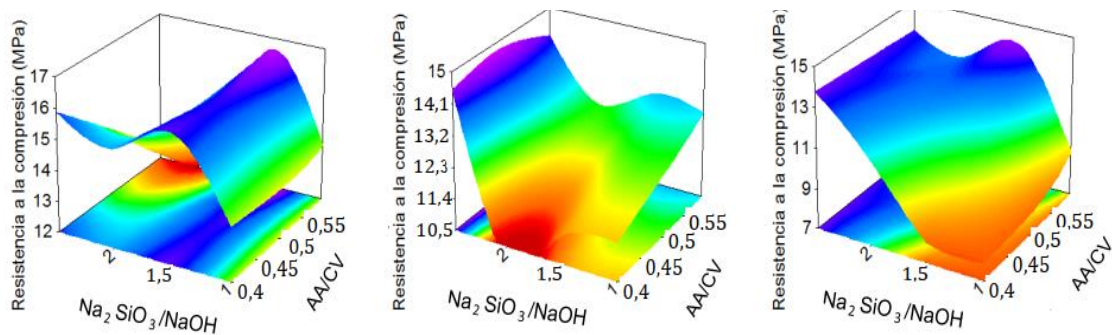
**Gráfico 12:** Mezclas de mortero activado alcalinamente curadas 14 días a temperatura ambiente.



Fuente: (Prieto, Montano, Parra, & Puerto, 2019)

El comportamiento mostrado tras 14 días de curado a temperatura ambiente solo confirma lo analizado en las muestras ensayadas tras sete dias de curado. El curado a temperatura ambiente no es el que mas conviene a este tipo de mezclas, más cuando la consideramos como posible reemplazo a las mezclas convensionales de cemento portland, el tiempo de fraguado constituye un factor decisivo con la capacidad de influir en los costos asociados a este tipo de solución.

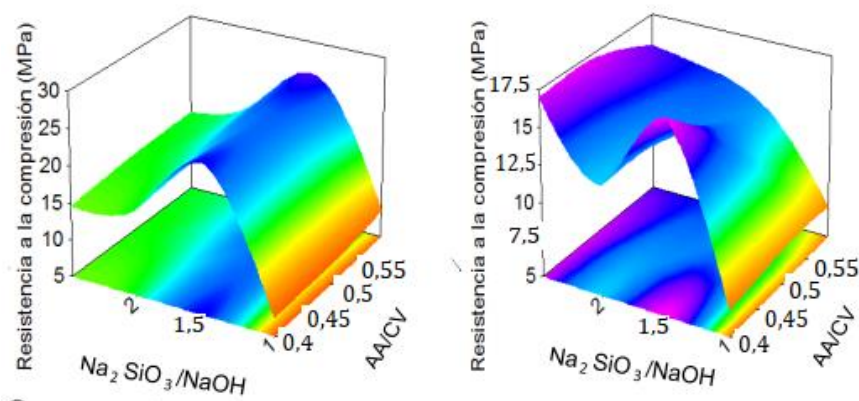
**Gráfico 13:** *Mezclas de Mortero Activado Alcalinamente Curadas 28 días a Temperatura Ambiente.*



Fuente: (Prieto, Montano, Parra, & Puerto, 2019)

Tras 28 días de curado a temperatura ambiente ninguna de las configuraciones para las mezclas activadas supero los valores para la resistencia a la compresión obtenidos por las muestras curadas en horno durante 24 horas, en este caso las muestras con mejor comportamiento fueron las correspondientes a las mezclas con proporción molar de hidróxido de sodio 10 y 12, con una relación  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  de 1.5 y una relación AA/CV de 0.4 sometidas a curado en horno durante 24 horas.

**Gráfico 14:** Mezclas de Mortero Activado Alcalinamente (NaOH 10M y 12M)  
Curadas Durante 24 Horas a 80°C.



Fuente: (Prieto, Montano, Parra, & Puerto, 2019)

Las pruebas de fluidez aplicadas a las mezclas mencionadas arrojaron valores de 95% y 75% lo cual indica que la trabajabilidad de estas mezclas no es ideal para la elaboración de elementos prefabricados, especialmente si dichos elementos presentan geometrías complejas.

**Conclusiones:** el desarrollo del trabajo de investigación contiene elementos muy llamativos de acuerdo a la cantidad de ensayos realizados, si bien los autores expresan que el fin principal es elaborar una mezcla apta para la realización de elementos prefabricados, los datos aportados nos permiten conocer las proporciones adecuadas para lograr un buen comportamiento en cuanto resistencia a la compresión se refiere.

Otro aspecto importante es que las mezclas de activación alcalina necesitan ser expuestas a temperaturas superiores al ambiente para realizar su curado, en este caso los autores siguieron las recomendaciones expuestas por Bhagath Singh y Subramaniam, 2017b, donde se establece que las temperaturas ideales de curado se encuentran en el rango entre los 60°C y los 85°C.

Para finalizar, los ensayos nos enseñan la relación directa entre la proporción  $\text{AA}/\text{CV}$  y la fluidez de las mezclas, en este caso se presenta un comportamiento contrario a las mezclas convencionales de CPO, pues si bien entre más proporción de activador tengan las mezclas garantiza la disolución del material cementante al aumentar el pH de la mezcla, el exceso de activador puede tener incidencia en el aumento de la porosidad de la mezcla y por ende una reducción en la resistencia a la compresión (Jiménez y Sánchez, 2007). En el caso del silicato de sodio, su exceso puede llevar a que no se pueda homogenizar la mezcla correctamente



y material cementante (CV) quede segregado formando poros de tamaño considerable. Las mezclas de mejor comportamiento tenían una proporción  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  de 1.5 por lo que se deduce que la combinación de activadores es ideal pues garantiza una mejor fluidez y mejores propiedades mecánicas de la mezcla activada.

**Autor 4:** Jesús Orlando Castaño Tabares, Estefanía Robayo Núñez & Édgar Humberto Sánchez Cotte.

**Tema:** Materiales de construcción sostenibles. Comportamiento mecánico y durabilidad de morteros con cenizas volantes activadas alcalinamente (Art).

**Desarrollo:** En este artículo científico, los autores someten a ensayos mezclas de mortero de activación alcalina con ceniza volante con el fin de demostrar las propiedades mecánicas que se le atribuyen, para ello realizan mezclas a las que se les varía el tipo de activador, en este caso los activadores seleccionados son el hidróxido de sodio y el silicato de sodio, los cuales son incorporados en la mezcla en diferente proporción. Adicional, se prepara una mezcla de mortero convencional para control con CPO y agua y una mezcla de mortero con CPO y los agentes activadores mencionados. En la práctica todas las mezclas tienen el mismo contenido de arena tal como lo recomienda la norma ASTM C109M, esta es de 2,75 partes de arena por parte material cementante (1 / 2,75). En cuanto a la relación AA/CV, los autores no hacen claridad, por lo tanto, se asume que se tomó el valor mínimo sugerido el cual es de 0,4. La siguiente es la configuración seleccionada para cada una de las mezclas:

- **Mezcla 1:** con cemento portland.
- **Mezcla 2:** con ceniza volante activada 100 % NaOH.
- **Mezcla 3:** con ceniza volante activada 75 % NaOH y 25 %  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ .
- **Mezcla 4:** con ceniza volante activada 50 % NaOH y 50 %  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ .
- **Mezcla 5:** con ceniza volante activada 25 % NaOH y 75 %  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ .
- **Mezcla 6:** con cemento de uso general.

Para el ensayo de resistencia a la compresión, al igual que en los trabajos ya analizados, los autores siguen las recomendaciones de la norma NTC 121 y se elaboran cubos de 5cm de lado con un volumen total de 0.005m<sup>3</sup>, los cuales se ensayan a los 7, 28 y 56 días, en cuanto al curado de las mezclas no se hace ninguna aclaración especial por tanto se infiere que estas fueron curadas a temperatura ambiente. Los resultados obtenidos luego del ensayo de resistencia a la compresión se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 11:** *Resultados Ensayo de Resistencia a la Compresión.*

Resistencia a compresión (Mpa)				
Mezclas	2 días	7 días	28 días	56 días
Mezcla 1	15.243	28.926	38.726	41.102
Mezcla 2	13.653	20.555	25.025	27.883
Mezcla 3	8.48	16.597	18.947	21.716
Mezcla 4	0.277	0.677	0.768	0.731
Mezcla 5	0.592	0.723	1.072	1.086
Mezcla 6	9.447	23.277	24.147	27.22

Fuente: (Castaño, Robayo, & Sanchez, 2013)

Al realizar el análisis de los datos obtenidos en las pruebas, podemos comprobar que el curado de las muestras efectivamente se realizó a temperatura ambiente pues, como habíamos notado anteriormente, al exponer las mezclas de activación alcalina a una temperatura entre los 60°C y los 85°C en 24 horas puede alcanzar la misma resistencia que a una mezcla de mortero convencional de CPO le tomaría aproximadamente 28 días en alcanzar.

Por otro lado en lo referente al comportamiento de las muestras número 4 y 5 se notan valores que no corresponden con el comportamiento observado en los documentos analizados con anterioridad, en estos casos, independiente del tiempo de curado, las muestran una resistencia nula, por lo tanto sería necesario determinar con nuevas pruebas si se incurrió en un error, deficiencia en el mezclado o si los precursores usados carecían de las características necesarias para la elaboración de mezclas activadas. En cuanto a las mezclas activadas

número 2 y 3 se evidencia que tienen un comportamiento más acorde con lo estudiado con anterioridad pues la mezcla va ganando resistencia con el paso del tiempo, el curado de la mezcla se realiza de forma más lenta, de hecho, la muestra numero dos presenta mejores resultados sobre su par pero su resistencia tras 56 días de curado aproximadamente la misma que la presentada por la mezcla de control a los 14 días, con lo cual, a pesar de cumplir con la NTC 121 y está por encima de los 24 mega pascales a los 28 días, sigue estando por debajo del comportamiento mostrado por la mezcla de prueba número 1.

A parte de los ensayos de resistencia a la compresión, los autores enfrentaron las mezclas a dos pruebas más, la primera es la de resistencia a los esfuerzos en tensión, sabemos que las mezclas de mortero convencionales, incluso las de concreto, presentan resistencias a la tensión bajas comparadas con la resistencia a la compresión, esta es la razón de que usemos refuerzos en acero. En este se elaboraron viguetas tal como se dispone en la norma NTC 121 y se ensayaron a los 7 28 y 56 días, los resultados obtenidos fueron los siguientes:

**Tabla 12:** *Resultados Ensayo de Resistencia a la Flexión.*

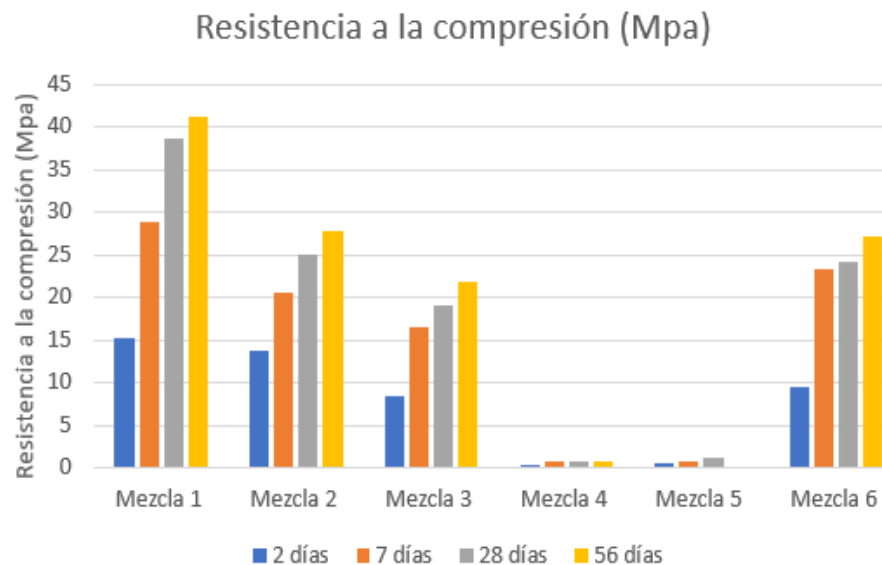
MEZCLA	Resistencia a Flexión (MPa)		
	7 días	28 días	56 días
Mezcla 1	5.643	7.156	7.075
Mezcla 2	3.162	5.234	6.284
Mezcla 3	3.244	3.626	3.708
Mezcla 4	0.354	0.545	0.668
Mezcla 5	0.164	0.218	0.409
Mezcla 6	4.621	6.202	6.652

Fuente: Fuente: (Castaño, Robayo, & Sanchez, 2013)

Tal como lo vimos en el ensayo de resistencia a la compresión, los resultados más bajos fueron los de las mezclas 4 y 5 por lo que podemos comprobar que los datos no son confiables y se debe realizar una nueva prueba con el fin de descartar errores en el procedimiento, pues a pesar de tener configuraciones diferentes en cuanto a la proporción de activadores alcalinos, la reacción entre estos y el material cementante debería tener cierto grado de similitud, tal como se ve en la tabla 10 los valores de las mezclas 2 y 3, con mayor proporción de NaOH son superiores a los de las muestras 4 y 5 en donde en  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  es mayor. Como se notó en los documentos anteriores el exceso de  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  conlleva a una disminución de la resistencia

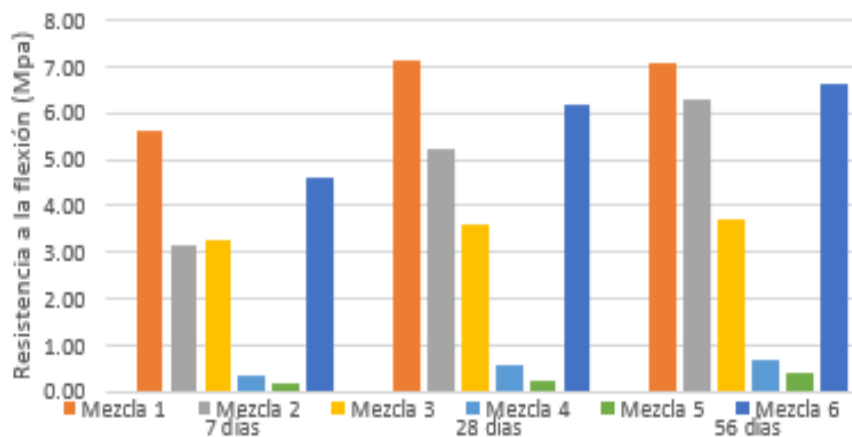
a la compresión, autores como (Hadi et al., 2018) relatan el efecto negativo de tener más iones de sílice y sodio de lo requerido, ¿pero es posible que también se afecte la resistencia a la flexión? A continuación, el comportamiento general de los ensayos a las mezclas:

**Gráfico 15:** *Resistencia a la Compresión.*



Fuente: Fuente: (Castaño, Robayo, & Sanchez, 2013)

**Gráfico 16:** *Resistencia a la Flexión.*



Fuente: Fuente: (Castaño, Robayo, & Sanchez, 2013)

Como se puede apreciar en cada una de las graficas, ninguna de las mezclas de activacion alcalina superan las propiedades mecanicas presentadas por las mezclas de mortero con CPO que sirven de control. El mejor comportamiento en ambos ensayos lo presento la muestra numero dos (2) ya que muestra un comportamiento acorde a lo esperado, su resistencia se incrementa con el paso del tiempo, cumpliendo con los valores dispuestos en la NTC 121 para el ensayo a compresion y cuyo valor minimo es de 15 y 24 mega pascales a los siete y ventiocho días respectivamente.

La tercer prueba a la que se expuso las muestras de activacio alcalina fue la de ressenencia a altas temperaturas, esta prueba resulta llamativa porque incrementa el rango de posibles usos que se les puede dar a este tipo de mezclas, para la realizacion del ensayo se sometio a las probetas curadas durante veitiocho dias a temperaturas de 400°C y 700°C en un periodo de dos horas, posteriormente se dejaron enfria y se realizo el ensayo de resistencia a la compresion y el de resistencia a la flexión, estos son los resultados obtenidos:

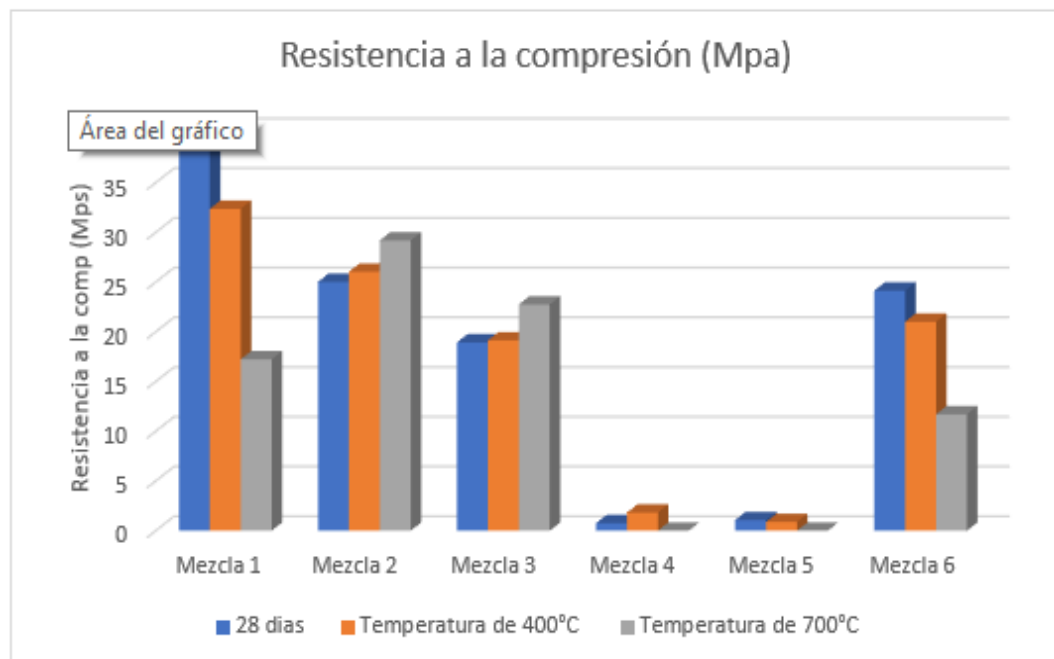
**Tabla 13:** *Resistencia a Altas Temperaturas, Resultados de Resistencia Compresión y Flexión.*

Ensayo	Temp °C	Mezclas					
		Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5	Mezcla 6
Resistencia compresión (Mpa)	Temperatura de 400°C	32.366	26.039	19.144	1.827	0.886	21.011
	Temperatura de 700°C	17.236	29.193	22.753	0.000	0.000	11.705
Resistencia flexión (Mpa)	Temperatura de 400°C	5.835	3.435	2.631	0.545	0.000	4.158
	Temperatura de 700°C	0.879	4.403	3.408	0.000	0.000	0.954

Fuente: Fuente: (Castaño, Robayo, & Sanchez, 2013)

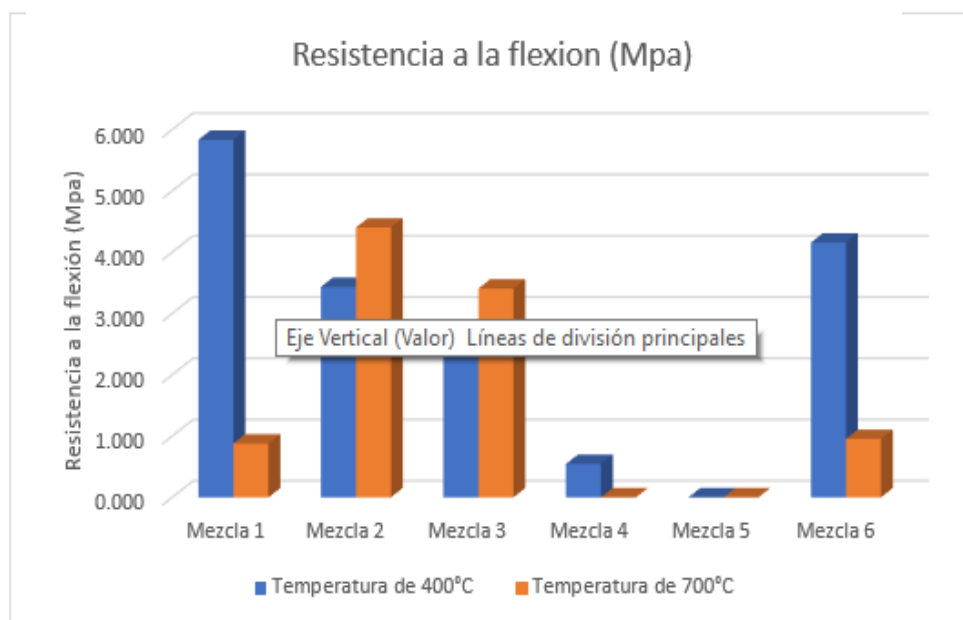
Al ser sometidas a altas temperaturas podemos notar una diferencia entre las mezclas activadas, a excepcion de las mezclas 4 y 5 que persisten en su tendencia a cero,y las de control. En estas ultimas, es notable la perdida de condiciones mecanicas ya que pasan, en el caso de la muestra 1, de tener casi 39 mega pascales a los 28 dias de curado, a tener 31 y algo mas de 17 mega pascales luego de dos horas de exposicion a 400°C y 700°C respectivamente, lo cual en su orden representa una reduccion del 16.4% y 55.5 % en su resistencia a la compresion, esta situacion se repite con la muestra 6. Por otro lado las muestras de mortero activadas presentan un incremento en ambas condiciones lo cual nos indica que la exposicion a la temperatura favorece este tipo de mezclas, la mezcla 2 es la que presenta un mejor comportamiento con un incremento en su resistencia a la compresion del 4% y 16.6% tras la exposicion a altas temperaturas. El comportamiento general de las muestras fue el siguiente:

**Gráfico 17:** *Resistencia a la Compresión Luego de Exposición a Altas Temperaturas.*



Fuente: Fuente: (Castaño, Robayo, & Sanchez, 2013)

**Gráfico 18:** Resistencia a la Flexión luego de Exposición a altas Temperaturas.



Fuente: Fuente: (Castaño, Robayo, & Sanchez, 2013)

**Conclusiones:** como primera medida podemos apuntar lo sensible que puede resultar el procedimiento de elaboración de una mezcla de activación alcalina, si bien en la literatura se nos instruye en cuanto a la importancia en la dosificación del activador y los inconvenientes que traen su exceso, en el caso del  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , para la incorporación de los demás precursores a la mezcla, la limitada manejabilidad y el exceso de iones de sodio y silicio que impiden una correcta polimerización, todos estos efectos inciden negativamente en las propiedades mecánicas de la mezcla. Pero en el caso de las muestras 5 y 6 se nota un comportamiento no acorde al esperado ya que los valores correspondientes para la resistencia a la compresión fueron muy bajos, cercanos a cero, motivo por el cual se necesitaría de nuevas pruebas en las que se determine con certeza si el comportamiento corresponde con las condiciones o si por el contrario demuestra que los datos reflejados son el resultado de un posible error en el procedimiento de elaboración de la mezcla.

Para finalizar, en el desarrollo de las pruebas de resistencia iniciales no se mostró un comportamiento sobresaliente de las mezclas activadas frente a las mezclas de control por lo que podemos confirmar que el curado a temperatura ambiente no es el más conveniente para este tipo de mezclas, esto lo podemos identificar tras la exposición de las muestras activadas a temperaturas altas, estas, a diferencia de las muestras de control, mejoraron sus condiciones mecánicas, lo cual nos lleva a pensar que pueden ser una opción a considerar en proyectos especiales donde los elementos de concreto convencional se ven expuestos a altas temperatura.

**Autor 5:** Angie Shirley Arias Prieto & Juan Felipe Becerra Ayala.

**Tema:** Análisis de la resistencia a compresión y a flexión en morteros elaborados con geopolímeros a base de ceniza volante y metacaolín activados alcalinamente.

**Desarrollo:** A través del desarrollo experimental, los autores del presente trabajo de investigación buscan crear una mezcla de activación alcalina a base de ceniza volante y meta caolín, para ello busca caracterizar las propiedades de cada uno de los materiales necesarios para la elaboración de las mezclas y las cantidades optimas con las que se obtengan los mejores resultados en cuanto a resistencia a compresión y flexión. Los activadores alcalinos seleccionados son el hidróxido de sodio y silicato de sodio los cuales serán incorporados a diferentes combinaciones y concentración molar. Con el fin de establecer diferencias, los autores compararon los resultados con mezclas convencionales de CPO. Los pasos seguidos por los autores fueron:

- Reconocimiento de la molaridad óptima de los activadores alcalinos y porcentaje de combinación entre los materiales cementantes (ceniza volante y meta caolín).
- Establecer el porcentaje de concentración de óxido de sodio para realizar los cubos de mortero.
- Comprobación de la resistencia a compresión y a flexión del mortero elaborado con geopolímeros activados alcalinamente y el mortero convencional.



El primer paso consto en someter la ceniza volante a un ensayo de fluorescencia de rayos x, tras la prueba se comprobó que la ceniza cuenta con los porcentajes adecuados en cuanto a contenido de dióxido de silicio y oxido de aluminio cumpliendo con lo dispuesto por la norma NTC 3493 para las cenizas volantes tipo F, el mismo procedimiento fue aplicado al Metacaolín, la siguiente tabla enseña los resultados del ensayo de fluorescencia de rayos x:

**Tabla 14:** Caracterización Química Ceniza Volante y Metacaolín – FRX.

Nombre Elemento	Elemento y/o Compuesto	CV % en peso	MK % en peso
Silicio	$\text{SiO}_2$	61.57	67.27
Aluminio	$\text{Al}_2\text{O}_3$	24.7	20.74
Hierro	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	5.18	1.17
Azufre	$\text{SO}_3$	1.38	N.D
Potasio	$\text{K}_2\text{O}$	1.53	2.7
Titanio	$\text{TiO}_2$	1.34	1.7
Calcio	$\text{CaO}$	1.21	N.D
Fosforo	$\text{P}_2\text{O}_5$	0.38	0.07
Magnesio	$\text{MgO}$	0.6	0.23
Sodio	$\text{Na}_2\text{O}$	0.53	0.3
Estroncio	$\text{Sr}$	0.11	N.D
Bario	$\text{Ba}$	0.08	N.D
Zirconio	$\text{Zr}$	0.04	0.06
Vanadio	$\text{V}$	0.03	0.03
Cerio	$\text{Ce}$	0.03	N.D

Fuente: (Arias & Becerra, 2017)

En cuanto a los agentes activadores los autores escogieron al hidroxido de sodio en estado solido en forma de escamas, este se prepara en solucion en agua destilada a diferentes concentraciones molares. Para ello se realizo la siguiente operación:

$$4 \text{ mol} * 39,997 \text{ g/mol} \approx 160 \text{ gramos de NaOH.}$$

El siguiente paso tiene que ver con la elaboracion de pastas de mezclas usando ceniza volante, metacaolin y activadores alcalinos en distintas proporciones. Como nuestro campo de estudio se centra en la activacion alcalina de la ceniza volante, solo tendremos en consideracion los resultados referentes al comportamiento de las pastas elaboradas en su totalidad con este componente. En este orden de ideas se prepararon cuatro tipos de pastas donde solo se incorporo ceniza volante como maerial cementante, estas fueron:

- NaOH con concentraciones de 6, 9 y 12 mol.
- $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ .
- Relación molar  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  igual a 1.0 con concentración de 5 mol de NaOH.
- Relación molar  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  igual a 1.5 con concentraciones de 3 y 5 mol de NaOH.

Luego de elaborar las pastas de ceniza y activador se las dispuso en moldes para su curado, a los siete días se comprobo su estado encontrando que no habian ganado resistencia suficiente por lo que los autores sometieron las muestras a curado en horno a una tempreratura de  $70^\circ\text{C}$  por un periodo de 24 horas luego de las cuales se observo que solo las mezclas activadas a 6 mol presentaban endurecimiento parcial, estas muestras continuaron su curado a temperatura ambiente hasta los 14 y 28 días para su ensayo. Habiendose cumplido los 28 días, las muestras activadas con  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  y con 9 y 12 mol de NaOH no llegaron a un estado de endurecimiento satisfactorio, solo se pudo tomar lectura en el ensayo de resistencia a la compresion a la mezcla activada a 6 mol de NaOH.

**Tabla 15:** Ensayo de Resistencia a la Compresión – Pastas de Ceniza tipo F.

Activador	Molaridad (mol)	Resistencia a Compresión (MPa)		
		7 (días)	14 (días)	28 (días)
NaOH	6	-	3.83	3.92
	9	-	-	-
	12	-	-	-
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	-	-	Aplastamiento	Aplastamiento

Fuente: (Arias & Becerra, 2017)

A pesar de transcurrir 28 días de curado y ser sometida a 70°C durante 24 horas los resultados correspondientes a la resistencia a la compresión, para la muestra con mejor desempeño, continúan siendo insuficientes, mas aun si es comparada con una pasta de cemento portland que a la misma edad, según el caso, puede sobrepasar los 22 megapascuales. En este caso, teniendo en cuenta las referencias de autores anteriores y literatura disponible podemos afirmar que el comportamiento reológico no corresponde con la expectativa.

En cuanto a las pastas activadas con la combinación de los dos activadores mencionados los autores escogieron una proporción de Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH de 1.0 y 1.5 en concentración molar de NaOH de 5 y 3 mol. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

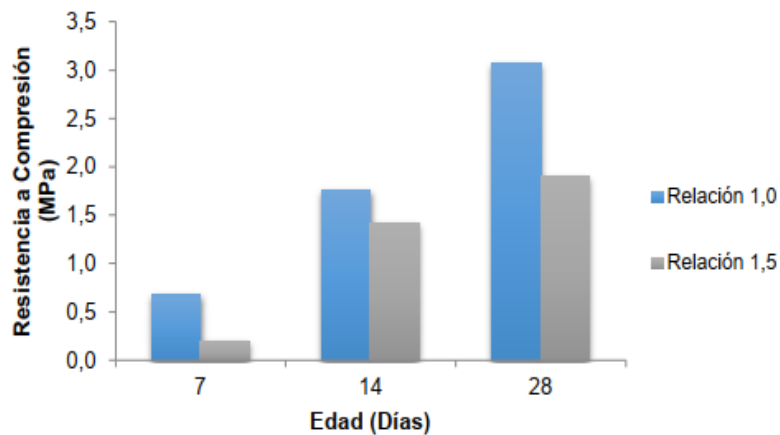
**Tabla 16:** Ensayo de Resistencia a la Compresión – Pastas de Ceniza tipo F.

Activador	Molaridad (mol)	Resistencia a Compresión (MPa)		
		7 (días)	14 (días)	28 (días)
$\frac{Na_2SiO_3}{NaOH} = 1.0$	5	0.68	1.75	3.07
$\frac{Na_2SiO_3}{NaOH} = 1.5$	3	0.46	0.81	1.27
	5	0.20	1.41	1.90

Fuente: (Arias & Becerra, 2017)

Como lo muestra la tabla, los mejores resultados surgen de la combinación de activadores con proporción  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  de 1.0, mientras la concentración molar de NaOH mas conveniente fue de 5. Este es el comportamiento general de las pastas activadas:

**Gráfico 19:** Resistencia a la Compresión – NaOH 5 mol.



Fuente: (Arias & Becerra, 2017)

**Conclusiones:** Al realizar la comparación de los datos presentados por las pastas de ceniza volante y activadores alcalinos el primer punto a resaltar es el proceso de activación de la mezcla, si bien el proceso de curado de estas mezclas es más lento, comparado con las mezclas con CPO, las mezclas activadas mostraron un comportamiento mecánico muy pobre en relación a lo esperado, las pastas de ceniza y activadores no superaron el umbral de los 5 mega pascales en su resistencia a la compresión lo cual nos lleva a inferir que la activación de la ceniza no se llevó a cabo de forma adecuada, esto se puede comprobar en el comportamiento descrito en trabajo donde se señala que tras siete días de curado las mezclas aún estaban en estado “fresco”, es decir, no presentaban resistencia alguna a la compresión, motivo por el cual se hizo necesario someter las mezclas a una temperatura de 70°C para acelerar su curado, luego, a los 28 días, las mezclas no habían alcanzado más de 4 mega pascales en resistencia.

En este caso los autores no hacen claridad de la proporción de ceniza y activadores mezclados por lo que se puede concluir que la combinación de estos elementos no fue la apropiada y

posiblemente la activación fue deficiente debido al exceso de activador en la mezcla. Recordemos que en los trabajos vistos con anterioridad resaltan la importancia de la dosificación de las mezclas alcalinas, activadores y material cementante, si bien en este caso se trabajó solo la pasta de ceniza, se esperaba que los valores obtenidos en cuanto a resistencia fueran similares o cercanos a los valores de referencia para morteros activados resaltando que este tipo de ensayos se realizan con el fin de proponer estas mezclas como sustituto a las mezclas convencionales de CPO.

La incongruencia de los datos con lo visto con anterioridad nos lleva a proponer que este tipo de muestras sean sometidas a un nuevo ensayo en donde se controle la relación entre activador y cementante y las debidas concentraciones y proporciones de activadores en caso de usarlos combinados.

**Autor 6:** Morales-Agundez C. G, Cruz-Enríquez A., Carlos Antonio Rosas, Susana Paola Arredondo, José Manuel Gómez S., Ramon Corral Higuera.

**Tema:** Evaluación y comparación de geopolímeros obtenidos de dos cenizas volantes mexicanas.

**Desarrollo:** En el presente trabajo de investigación los autores buscan establecer, mediante experimentación, las diferencias resultantes de trabajar con cenizas volantes en las cuales varia la proporción de óxidos entre otros parámetros. Para ello, se seleccionaron dos tipos de cenizas volantes, ceniza volante negra (CVN) y ceniza volante blanca (CVB), las cuales fueron sometidas a pruebas de caracterización en las cuales no se profundizará mas que en los resultados obtenidos. Para la activación de dichas cenizas se usó el mismo activador tanto en concentración molar como en proporción AA/CV y todas las mezclas se sometieron a curado en horno a una temperatura de 80°C durante 24 horas posterior al cual se realizó el desmoldado de las muestras y embalado en película plástica con el fin de retener la humedad, este proceso continuó en el horno a la misma temperatura con una humedad relativa del 99% y ensayados a los 3, 7, 14, 21, 28 y 90 días tomando como referencia la norma ASTM C109.

Pasos:

- Caracterización de las cenizas volantes CVN y CVB.
- Molienda y tamizado de cenizas.
- Preparación del activador alcalina NaOH.
- Preparación de las mezclas activadas.
- Curado en horno para desmolde (24 horas).
- Curado en horno a 80°C y humedad del 99%
- Ensayo de resistencia a la compresión de las muestras (3, 7, 14, 21, 28, 90 días).
- Presentación de resultados.

Para realizar la caracterización de las muestras se las sometió a un ensayo de fluorescencia de rayos X (FRX), esto con el fin de determinar la cantidad de óxido presentes en cada una de las muestras, como ya vimos anteriormente, los óxidos tienen una participación importante en la reacción y posterior formación de enlaces Si-O-Si y Si-O-Al que son la base de la formación de geles. Los resultados del ensayo fueron los siguientes:

**Tabla 17:** *Composición Química de las Cenizas Volantes.*

Porcentaje de óxidos	CVN	CVB	Porcentaje de óxidos	CVN	CVB
<b>MnO</b>	0.0184	0.0937	<b>SiO<sub>2</sub></b>	56.89	59.11
<b>SrO</b>	0.0476	0.1769	<b>CaO</b>	4.253	9.918
<b>ZrO<sub>2</sub></b>	0.0522	0.05336	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	5.566	4.638
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0.346	0.512	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	26.24	20.31
<b>SO<sub>3</sub></b>	0.704	0.336	<b>PPI</b>	2.47	-
<b>MgO</b>	0.718	1.74	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	-	0.11
<b>TiO<sub>2</sub></b>	1.21	1.65	<b>C</b>	-	0.19
<b>K<sub>2</sub>O</b>	1.49	1.17	-	-	-

Fuente: (Rosas, Arredondo, Gómez, & Corral, 2015)

Como resultado notable, a pesar de ambas cenizas califican como tipo F, se nota diferencias en el porcentaje de óxidos, algunos más notorios que otros como lo es el caso del óxido de calcio en el que la CVB duplica el contenido presente en la CVN.

Otro aspecto a considerar dentro de este estudio tiene que ver con el efecto del área superficial de la ceniza volante en el desarrollo de las propiedades mecánicas de la mezcla. Se prevé que A menor tamaño de las partículas se mejore el área de contacto y con ello la interacción con el activador. Para las mezclas a trabajar se dispuso el material en un molino de bolas de acero con el cual se buscó generar partículas cercanas a los 45 micrómetros. Luego de moler el material se tamizo con el tamiz N°325. Realizado el análisis de la distribución del tamaño de partículas los autores obtuvieron que la CVB tiene un porcentaje mayor del 13% en partículas de menor tamaño que se encuentran en el intervalo de 0.3 a 10 micrómetros, y la CVN tiene 15% de partículas que van desde 10 a 60 micro metros. Los resultados obtenidos para las áreas superficiales fueron:

**Tabla 18:** *Área Superficial de Cenizas Volantes.*

Muestra	Área superficial (m <sup>2</sup> /g)
CVN	1.609
CVB	3.093

Fuente: (Rosas, Arredondo, Gómez, & Corral, 2015)

Como se puede apreciar, el mejor resultado corresponde a la muestra de CVB, por lo tanto, se espera que sea la de mejor comportamiento.

El activador alcalino seleccionado fue el hidróxido de sodio la concentración molar seleccionada fue de 8 mol por lo que se prepararon, como ya se ha visto, 320 gramos de escamas de NaOH en un litro de agua destilada y se lo dejo reposar por tres horas. Acto seguido se procedió a elaborar las mezclas con cada una de las cenizas con una proporción AA/CV de 0.5 y posteriormente se llenaron los moldes cúbicos de 5 cm por lado según lo recomendado en la norma ASTM C109. Estas muestras pasaron a ser activadas en el horno a

80°C durante 24 horas, posteriormente se extrajo las muestras del horno y se las dejó en reposo para poderlas desmoldar, luego del desmoldado se cubrió las muestras con película plástica y se las introdujo nuevamente en el horno para continuar con el proceso de activación y curado durante 3, 7, 14, 21, 28 y 90 días tiempo en el cual se los mantuvo dentro de bolsas cerradas herméticamente dentro de agua destilada para garantizar una humedad relativa del 99%. Aplicados los ensayos de resistencia a la compresión a cada una de las muestras se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 19:** *Resistencia a la Compresión CVN y CVB.*

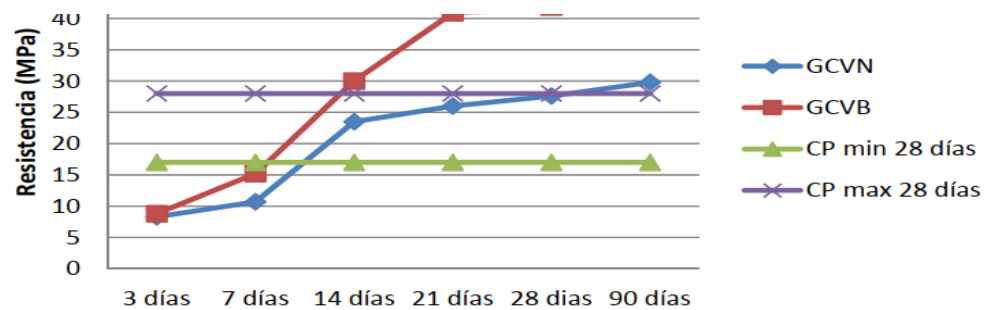
Tiempo de curado	Resistencia a la compresión (Mpa)					
	3 Días	7 Días	14 Días	21 Días	28 Días	90 Días
CVN	8.3	10.7	23.5	26	27.6	29.8
CVB	8.8	15.2	30	40.9	41.83	46.35

Fuente: (Rosas, Arredondo, Gómez, & Corral, 2015)

Tal como se esperaba, el mejor comportamiento fue mostrado por la muestra elaborada con ceniza volante blanca, esto abre la posibilidad a que la mayor presencia de óxidos, así como la mayor área superficial se pueden considerar como factores influyentes en el proceso de activación de la mezcla. Al comparar estos resultados con los obtenidos para una pasta de mortero convencional a los 28 días de curado se obtiene la presente gráfica.



**Gráfico 20:** *Comparativa Resistencia a la Compresión CV – CP.*



Fuente: (Rosas, Arredondo, Gómez, & Corral, 2015)

Claramente las propiedades mecánicas ofrecidas por las mezclas activadas presentan un comportamiento sobresaliente, si bien en edades tempranas su resistencia está por debajo de los límites mínimos ofrecidos por el cemento portland, a partir de los 14 días empieza a igualar los valores máximos y a los 28 días, en el caso de la CVB, supera considerablemente a la mezcla con CPO.

**Conclusiones:** En el presente trabajo de investigación se destacó la meticulosidad con la que los autores enfrentan la caracterización de la ceniza volante, esta fue sometida a diversos ensayos que, si bien no fueron expuestos, pueden llegar a ser determinantes para describir la reacción de la ceniza y las posteriores propiedades de la mezcla activada.

De igual forma se determinó la importancia de la presencia del óxido de calcio en la ceniza pues las muestras de ceniza fueron mezcladas en igualdad de condiciones y los resultados más notables los tuvo la ceniza con mayor presencia de este compuesto, esto nos permite inferir que muy posiblemente se puedan modificar las cenizas mediante la adición de este óxido, recordando que muy posiblemente se deba establecer mediante ensayos de laboratorio la proporción ideal de este óxido en la mezcla, adicional establecer efectos adversos, recordando que el calcio es uno de los elementos más reactivos de la naturaleza lo que se podría traducir en un rápido deterioro de las mezclas activadas.

Los resultados obtenidos para ambos tipos de ceniza nos permiten concluir que la exposición a la temperatura es determinante para la reacción y formación de geles por lo que pensar en

elaborar este tipo de mezclas a temperatura ambiente no puede resultar del todo práctico más que para el desarrollo de elementos prefabricados.

**Autor 7:** Claudia M. Ibáñez, Diani C. Saldaña.

**Tema:** Influencia de la relación de  $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$  en la resistencia y grado de lixiviación de geopolímeros obtenidos de cenizas de carbón.

**Desarrollo:** En el presente trabajo de investigación los autores tienen como principio la recuperación y reutilización de material producto de calcinación (ceniza), la cual debido a su composición química puede convertirse en un factor de riesgo a nivel ambiental al ser dispuesto a cielo abierto, esto debido a la presencia de metales pesados (plomo), que por medio del proceso de lixiviación pueden llegar a fuentes hídricas subterráneas. Los autores plantean como solución la creación de mezclas de mortero de activación alcalina en las cuales se puedan encapsular los elementos peligrosos y así evitar que causen afectación al medio ambiente al mismo tiempo que se le da un uso útil al mencionado material de desecho.

En cuanto al desarrollo de la mezcla los autores siguen la tesis de que relaciones bajas entre el hidróxido de sodio y el silicato de sodio contribuyen a la formación de mezclas con alto desempeño capaces de formar una matriz estable que encapsule los metales pesados, para ello proponen ensayar distintas combinaciones de mezclas donde el  $\text{NaOH}$  mantendrá una molaridad de 12 mol en cada una de ellas. Adicional, se pretende variar solo los porcentajes de participación de los activadores dentro de la mezcla, esto teniendo en cuenta que solo se hará uso de un tipo de ceniza la cual previamente será sometida a calcinación, la relación AA/CV se mantendrá en todos los casos en 0.35.

Pasos:

- Calcinación de la ceniza.
- Preparación de activadores alcalinos ( $\text{NaOH}$  12M).
- Preparación de las mezclas de mortero activado.
- Curado de las muestras de mortero.
- Ensayo de resistencia a la compresión.

- Ensayo de lixiviación de metales pesados.
- Presentación de resultados.

En el desarrollo de la práctica los autores optaron por realizar una calcinación previa a la ceniza volante a una temperatura de 500°C, esto se debe al origen de la ceniza seleccionada pues a diferencia de las cenizas vistas con anterioridad esta proviene de la industria papelera, los autores señalan que este tipo de ceniza tiene un contenido de inquemados del 18% lo que no le permite tener un buen desempeño como aditivo cementante al verse comprometida la adherencia.

En el caso de los activadores alcalinos, los autores seleccionaron el silicato de sodio e hidróxido de sodio, este último en una concentración 12 M el cual se preparó con anterioridad a la realización de la mezcla con la ceniza volante, las proporciones seleccionadas fueron las siguientes:

- **Mezcla 1:** 30% NaOH; 70% Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>
- **Mezcla 2:** 35% NaOH; 65% Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>
- **Mezcla 3:** 40% NaOH; 60% Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>
- **Mezcla 4:** 50% NaOH; 50% Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>

La proporción de activador material cementante en cada uno de los casos es de 0.35, la dosificación de cada mezcla se relaciona en la siguiente tabla:

**Tabla 20:** *Relación Proporción Materiales en Mezcla.*

Relción peso-volumen Ceniza & Activadores				
	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4
Ceniza(g)	1524.2	1521.77	1518.21	1513.96
NaOH 12M(mL)	156.2	182.3	208	215.43
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (14,6% Na <sub>2</sub> O 29,25% SiO <sub>2</sub> )	377.28	350.32	323.35	314.46
Agua (mL)	289.6	289.46	288.46	287.65

Fuente: (Ibañez & Saldaña, 2014)

Después de elaborar la mezcla según las proporciones señaladas se las dispuso según las recomendaciones de la norma NTC 121, cada muestra se dispuso en moldes cúbicos de 5cm por lado, seguidamente para su curado se las introdujo en un horno a 80°C durante un periodo de tres días tras los cuales se termina el curado a temperatura ambiente durante 14 y 28 días. A continuación, se presentan los resultados correspondientes a la resistencia a la compresión aclarando que es el ensayo seleccionado para medir la efectividad de las mezclas seleccionadas.

**Tabla 21:** *Resistencia a la Compresión.*

Resistencia a la compresión (Mpa)		
Tiempo de curado	14 Días	28 Días
Mezcla 1	31.84	35.52
Mezcla 2	24.6	27.78
Mezcla 3	18.6	19.21
Mezcla 4	5.72	16.56

Fuente: (Ibañez & Saldaña, 2014)

**Gráfico 21:** *Resistencia a la Compresión.*



Fuente: (Ibañez & Saldaña, 2014)

Como se aprecia, las mezclas con mejor desempeño fueron la mezcla 1 y 2 respectivamente, ambas cumplen y superan la resistencia mínima sugerida por la norma NTC121, motivo por el cual este tipo de mezclas pueden ser tenidas en cuenta como alternativa para el reemplazo de las mezclas convencionales.

**Conclusiones:** en este trabajo de investigación se pudo notar la dificultad presente en el uso de cenizas volantes de diferentes orígenes. Los porcentajes de materiales no calcinados presentes en estas constituyen un factor de riesgo que debe ser superado mediante el uso de técnicas como la calcinación y la molienda para garantizar que la ceniza volante cuente con las características idóneas que contribuyan con el proceso de activación.

El proceso sugerido por los autores nos muestra que hay que ser muy cuidadoso al momento de seleccionar el material a usar, en este caso puede representar una desventaja frente a las mezclas de cemento portland debido a que usualmente en obra el personal a cargo solo debe preparar la mezcla (cemento, arena y agua) sin mayor preocupación que agregar adecuadamente las cantidades.

Una de las ventajas adicionales de las mezclas de activación alcalina expuesta por los autores radica en grado de encapsulamiento de metales pesados, este tipo de mezcla puede aportar a la prevención en la contaminación de las fuentes hídricas por lixiviación de elementos peligrosos como el plomo o el arsénico. A pesar que nuestro enfoque se centra más en las propiedades mecánicas, específicamente la resistencia a la compresión, es muy importante someter este tipo de muestras a diversos ensayos puesto que esto puede contribuir en la ampliación del campo de acción de estas mezclas y así considerarlas en diversidad de proyectos constructivos no solo en la edificación de viviendas.

**Autor 8:** Nicolás Alejandro López Castillo & Angie Nathalia Hernández Mora.

**Tema:** Incidencia de la temperatura ambiente en la formación de compuestos cementantes mediante la activación alcalina de cenizas de carbón.

**Desarrollo:** Como hemos visto en los trabajos y literatura previa consultada, la temperatura de curado tiene un papel fundamental para el proceso de activación de las mezclas. En este documento el autor realiza una investigación de los factores que rodean la activación de las mezclas de activación alcalina a temperatura ambiente realizando una descripción clara de las fases cementantes donde se genera la mineralogía responsable de las propiedades mecánicas. Para el autor las mezclas alcalinas deben ser orientadas a métodos de curado más prácticos, si bien resalta los resultados de otros trabajos de investigación en los que se llega a afirmar que las temperaturas idóneas de activación se encuentran en el rango entre los 60°C y los 90°C, no considera conveniente que se mantenga esta tendencia puesto que limitaría el uso de las mezclas activadas frente a las mezclas convencionales con CPO.

Para el desarrollo de su investigación los autores establecen tres etapas. En la primera etapa realiza la caracterización de las materias primas con el fin de comprobar su composición química y calidad. La segunda etapa corresponde al diseño y evaluación de las propiedades mineralógicas, esta etapa se divide en dos apartados, en el primero se busca desarrollar, mediante la experimentación, un diseño de mezcla de activación alcalina. En el segundo apartado de esta etapa se busca la identificación de las etapas cementantes del diseño de mezcla desarrollado previamente. Para la etapa tres se destinan todos los ensayos de laboratorio con el fin de determinar las propiedades mecánicas de la mezcla para ello se realizan variaciones en la temperatura de mezclado, dichas temperaturas no superan la temperatura ambiente.

Para el desarrollo de la investigación se seleccionaron cenizas de dos fuentes distintas con el fin de medir la variación en los resultados, estas provienen de distintas industrias como lo son la papelera, la que en adelante se define como Ceniza P, y la textilera, que en adelante se identifica como Ceniza C. El primer paso es lograr, mediante la difracción de rayos x (DRX) y la fluorescencia de rayos x (FRX), la composición química a fin de comprobar que son aptas para ser activadas. Como activador se seleccionó el NaOH en forma de escamas con un 98% de pureza, adicional, cemento portland tipo uno con el que se elaboró la mezcla de control contra la que se compararon los resultados obtenidos en las mezclas activadas.

Los resultados del análisis químico de las muestras de ceniza son los siguientes:

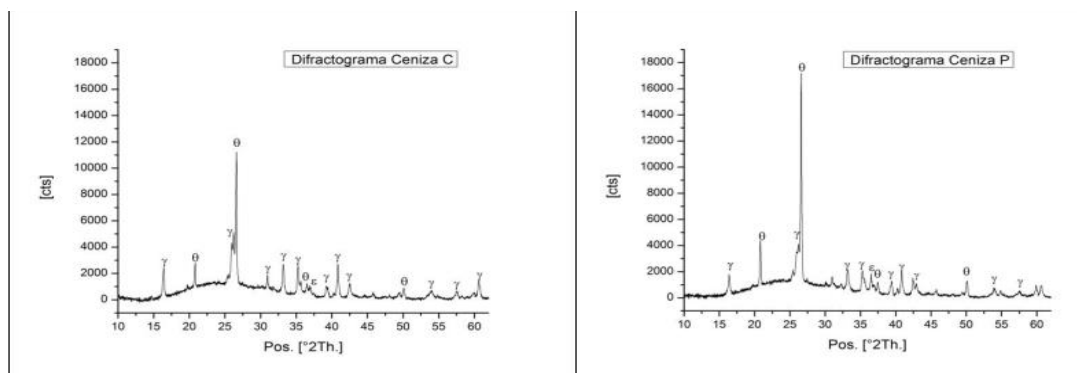
**Tabla 22:** *Composición Química de Cenizas.*

Muestra	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	CuO	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	SrO	ZnO	110°C a 1000°C
Ceniza C	46,2	31,4	4,75	4,46	1,82	3,63	1,42	1,18	0,04	0,01	0,09	0,68	0,14	0,27	3,9
Ceniza P	40,5	28,3	2,24	5,97	1,52	5,91	1,20	1,23	0,04	1,03	0,03	0,60	0,68	0,02	10,77

Fuente: (Jaramillo, 2013)

En este punto se comprueba que ambas cenizas cumplen con lo dispuesto en la norma ASTM C618 para cenizas volantes tipo F, adicional a esto la composición mineralógica obtenida con el ensayo de difracción de rayos x determina las fases cristalinas presentes entre las que se destaca la mullita la cual está relacionada con niveles de óxido de calcio por debajo del 10%.

**Gráfico 22:** *Difractograma de Cenizas.*



Fuente: (Jaramillo, 2013)

En cuanto al activador alcalino la opción seleccionada fue el hidróxido de sodio (NaOH), para la preparación de las muestras experimentales este se preparó en disolución con agua potable en molaridades de 6M, 8M y 10M. La relación entre el activador alcalino y la ceniza volante se estableció en tres valores, 0.24, 0.28 y 0.32, cada mezcla se dispuso para su curado a

diferentes temperaturas cercanas a la temperatura ambiente empezando en los 8°C seguido de 18°C, 28°C y 38°C. La combinaciones de mezclas de acuerdo a lo mencionado se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 23:** *Combinaciones de Mezcla de Ceniza Activada.*

OrdenCorrida	Temperatura °C Bloques	Relación (a/mc)	Concentración Molar de Na(OH)
1	28	0,24	6
2	28	0,24	8
3	28	0,24	10
4	28	0,32	10
5	28	0,32	6
6	28	0,32	8
7	28	0,28	8
8	28	0,28	6
9	28	0,28	10
10	38	0,28	10
11	38	0,32	10
12	38	0,24	10
13	38	0,24	6
14	38	0,24	8
15	38	0,32	6
16	38	0,28	8
17	38	0,28	6
18	38	0,32	8
19	38	0,32	6
20	8	0,28	8
21	8	0,24	8
22	8	0,32	10
23	8	0,24	10
24	8	0,28	6
25	8	0,24	6
26	8	0,28	10
27	8	0,32	8
28	18	0,24	6
29	18	0,24	10
30	18	0,32	6
31	18	0,28	10
32	18	0,28	8
33	18	0,28	6
34	18	0,32	8
35	18	0,32	10
36	18	0,24	8

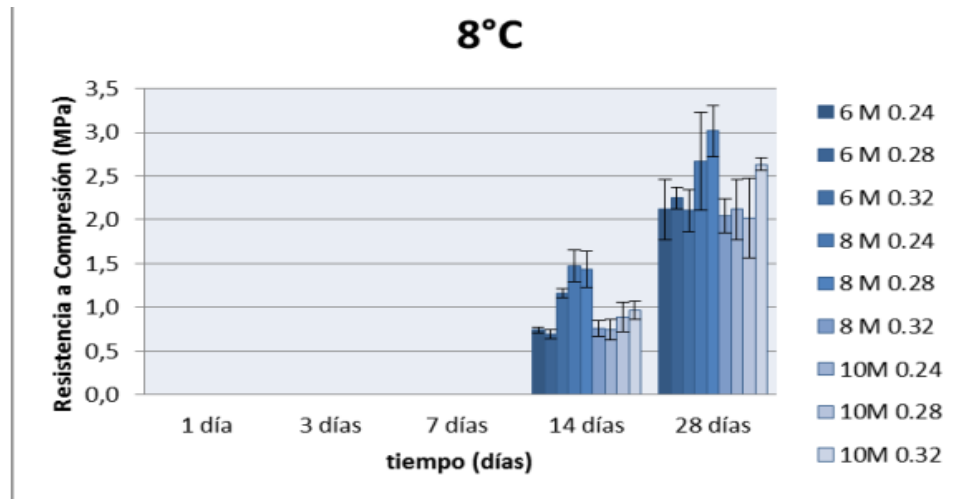
Fuente: (Jaramillo, 2013)

Para el ensayo de cada una de las mezclas los autores usaron probetas cilíndricas de 2.54cm de diámetro, con relación de aspecto L/D=2, el vaciado de las mismas se realizó en tres capas las cuales se compactaron según lo indica la norma, después de armar las probetas se las introduce en bolsas plásticas y se sellan al vacío. Luego se dispone las probetas dentro de cubetas de agua para su curado a las temperaturas señaladas. posteriormente se realizó el ensayo a cada una de las combinaciones de mezclas activadas, los ensayos se realizaron en



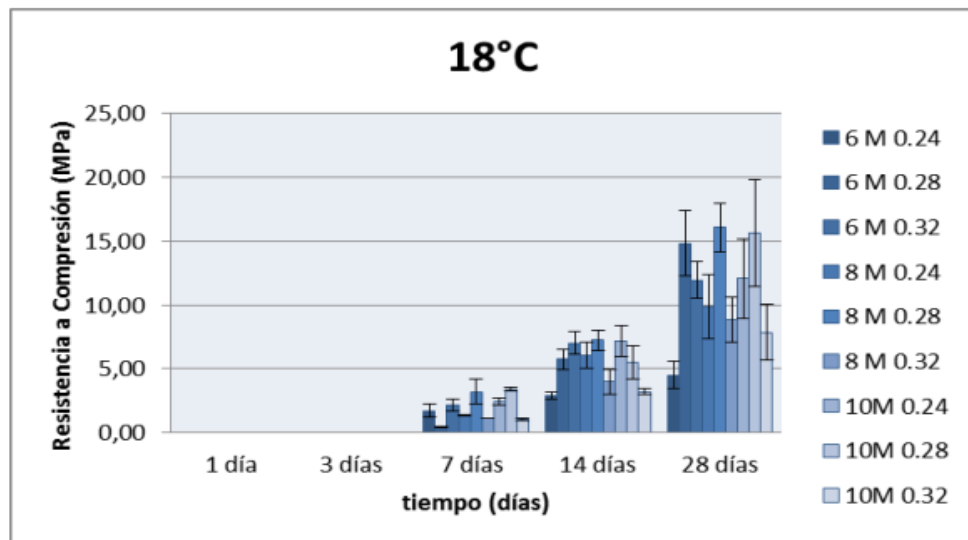
los días 1, 3 7, 14 y 28. El comportamiento presentado en el ensayo de resistencia a la compresión según la temperatura de curado es el siguiente:

**Gráfico 23:** *Resistencia a Compresión Curado a 8°C.*



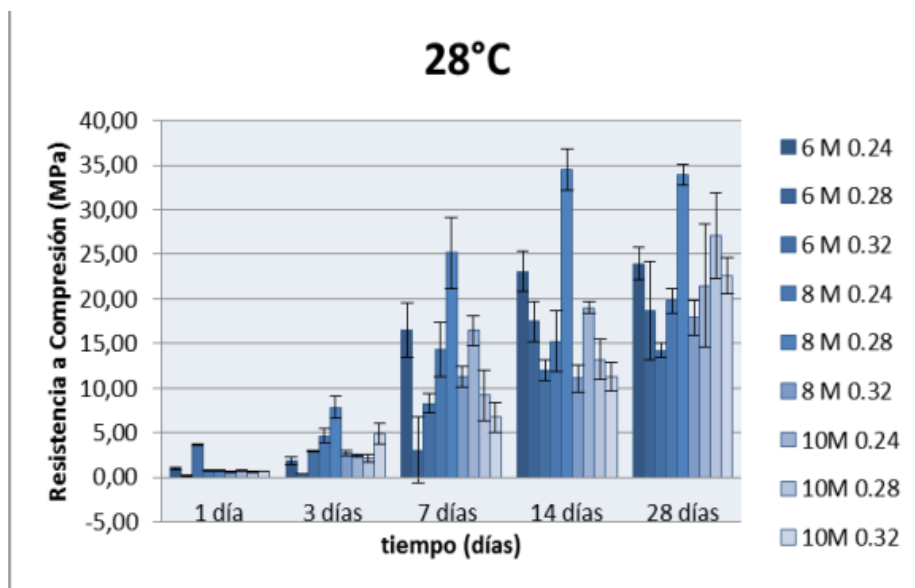
Fuente: (Jaramillo, 2013)

**Gráfico 24:** *Resistencia a Compresión Curado a 18°C.*



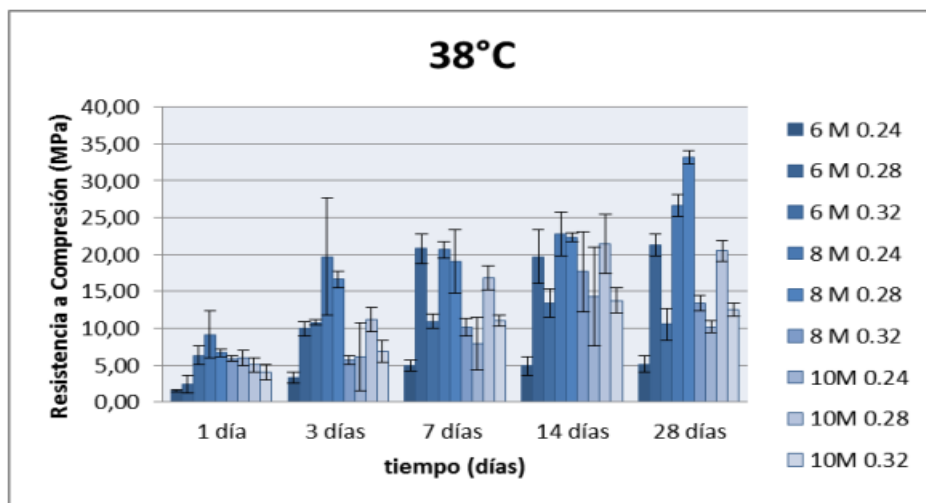
Fuente: (Jaramillo, 2013)

**Gráfico 25:** Resistencia a Compresión Curado a 28°C.



Fuente: (Jaramillo, 2013)

**Gráfico 26:** Resistencia a Compresión Curado a 38°C.



Fuente: (Jaramillo, 2013)

En cuanto a los datos obtenidos en el desarrollo de las pruebas, los autores realizaron un análisis de varianza (ANOVA) por medio del software Minita, el mismo les permitió a través de una hipótesis determinar cuál factor era determinante para el desarrollo de las fases cementantes de las diferentes mezclas. Los resultados presentados por el software son:

**Tabla 24:** Resultados de ANOVA para las Diferentes Edades.

Factor	Valor P (0,05)				
	1 día	3 días	7 días	14 días	28 días
Bloque Temperatura (T)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Concentración (C)	0,123	0,281	0,190	0,409	0,051
Relación a/c (R)	0,894	0,177	0,054	0,988	0,040
Interacción (C*R)	0,593	0,198	0,723	0,259	0,696

Fuente: (Jaramillo, 2013)

Según el análisis estadístico, los autores concluyen que en todas las edades el factor de mayor importancia en la velocidad de formación de las fases cementantes es la temperatura pues su aumento está relacionado con la mejoría en la resistencia a la compresión. De acuerdo a lo visto en las gráficas las mezclas alcalinas desarrollan resistencias a los tres primeros días siempre y cuando la temperatura de curado se ubique por encima de los 18°C.

Por otro lado, el segundo factor que mostro valor de significancia según el análisis fue la relación de activador – material cementante (AA/MC), en este caso ceniza volante. Esto se hace evidente a los 28 días. En general valores altos de AA/CV produce resistencias tempranas más elevadas, situación que se revierte a edades superiores a 28 días donde valores bajos de AA/CV se relacionan con mejores resistencias mecánicas.

**Conclusiones:** En cuanto al desarrollo del análisis de datos, este trabajo de investigación nos enseña que las ayudas tecnológicas nos permiten llegar a unas conclusiones más objetivas y cercanas al comportamiento de los fenómenos estudiados, sin embargo, esto nos exige ser aún más meticulosos al momento de la toma de datos para evitar la presentación de datos erróneos. Como se ha mencionado a lo largo de nuestro trabajo de investigación la temperatura es un factor determinante, en este caso pudimos comprobar la alta influencia que este tiene a lo largo del desarrollo de las fases cementantes de las mezclas. En otras literaturas hacen énfasis en la activación de las mezclas a temperaturas entre los 60°C y los 90°C, pero estas temperaturas de activación hacen poco probable que se pueda usar las mezclas en obra como si se puede con las mezclas convencionales de mortero con CPO.

En el desarrollo de las pruebas se demostró que las mezclas activadas pueden desarrollar resistencias mecánicas significativas a temperaturas ambiente entre los 28°C y 38°C, en este caso la mezcla con mejor comportamiento fue la mezcla con una concentración 8 molar y un módulo igual a 0.28, esta mezcla alcanzo los 34 mega pascals a los 28 días, valor con el que cumple y supera lo establecido en la norma.

**Autor 9:** Dr. Francisca Puertas, Dr. Marta Palacios & Dr. Ruby de Gutiérrez.

**Tema:** Morteros de Escoria Activada Alcalinamente. Propiedades y Durabilidad.

**Desarrollo:** En el documento presentado por las autoras se muestra la necesidad por encontrar materiales que sean sostenibles como reemplazo al cemento portland y al gran costo energético y ecológico propio de su producción. Si bien su campo de estudio abarca material de desecho distinto al que hemos seleccionado, la ceniza volante y la escoria de alto horno guardan cierto grado de similitud en cuanto a su composición química, ambas presentan una naturaleza básica (no férricas) las cuales le permiten tener una reacción alcalina, al igual que en la ceniza volante, la concentración de óxidos, como el óxido de calcio, es variable y se puede modificar. Este documento fue seleccionado debido a que en él se realizan aportes significativos en cuanto al comportamiento de los activadores, por lo tanto, se pueden establecer semejanzas con los trabajos estudiados con anterioridad y así generar una idea más completa de como llevan a cabo su función dentro de la mezcla.

Para su trabajo de investigación las autoras seleccionaron cuatro muestras de activación alcalina las cuales tomaron siguiendo como referencia diversas literaturas, una quinta muestra de con cemento portland hizo las veces de control para demostrar que tanta diferencia existe

entre una mezcla de activación alcalina y una convencional, los pasos seguidos se describen a continuación:

- Caracterización de la escoria de alto horno.
- Definición de las mezclas.
- Preparación de activadores.
- Preparación de las mezclas de activación alcalina.
- Ensayo de resistencia a la compresión.
- Prueba de estabilidad de volumen de mezcla.
- Presentación de resultados.

Para empezar, se realizó un análisis químico de la escoria seleccionada para comprobar que cumpla con los parámetros para ser tomada en cuenta como material cementante, entre estos que los niveles de presencia de óxidos de naturaleza básica se encuentren cercanos o superen el 70% y que cuente con una granulometría adecuada recordando la relación entre esta y el área superficial de las partículas. A continuación, se muestra la comparativa de composición química de muestras de escoria de alto horno, ceniza volante y cemento portland.

**Tabla 25:** *Composición Química de Materias Primas.*

	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	S <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O
Escoria	41.37	34.95	13.11	0.69	7.12	0.06	1.92	0.27	0.23
Ceniza	9.91	59.11	20.31	4.638	1.74	0.33	----	0.51	1.17
Cemento	64.41	19.97	5.17	3.85	2.65	2.64	----	0.39	0.78

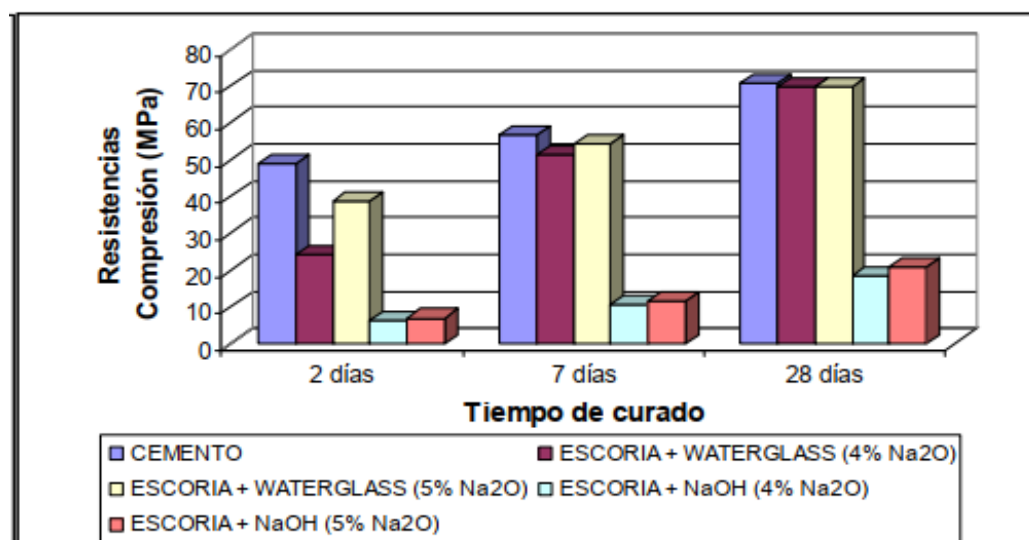
Fuente: (Puertas, Palacios, & Gutierrez, 2007)

Como primer punto analizamos el contenido de óxido de calcio, responsable en buena medida de la reacción alcalina, y notamos que la ceniza volante seleccionada tiene el valor más bajo por lo tanto para que tenga un buen desempeño buscaríamos incrementar este valor mediante la adición directa de este óxido a la mezcla, no obstante, en la ceniza se pueden hallar porcentajes más elevados en otros óxidos de naturaleza básica como el óxido de potasio.

Para la elaboración de las mezclas se usó la escoria mencionada y como activadores alcalinos el hidróxido de sodio y el silicato de sodio en concentraciones del 4 % y 5% para un total de 4 combinaciones de mezcla de activación alcalina y una mezcla de control con cemento portland. La relación arena - material cementante en cada caso se definió como 2/1 y la relación liquido solido fue determinada mediante ensayo de escurrimiento, en este caso se siguió la norma europea UNE-80-116-86. De igual manera los ensayos de resistencia a flexo tracción y compresión se guiaron según la norma UNE-EN 196-1, recordemos que no hay normatividad clara vigente para mezclas de activación alcalina por lo que se hace uso de las dispuestas para concretos a base de cemento portland.

Las muestras se dispusieron en probetas de 4x4x16 cm y se ensayaron a los 2, 7 y 28 días, las autoras no informan de condiciones especiales de curado de las mezclas como aplicación de temperatura por lo tanto se asume que el curado de las mezclas se realizó a temperatura ambiente. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente gráfica:

**Gráfico 27:** *Resistencia a la Compresión Vs Tiempo.*



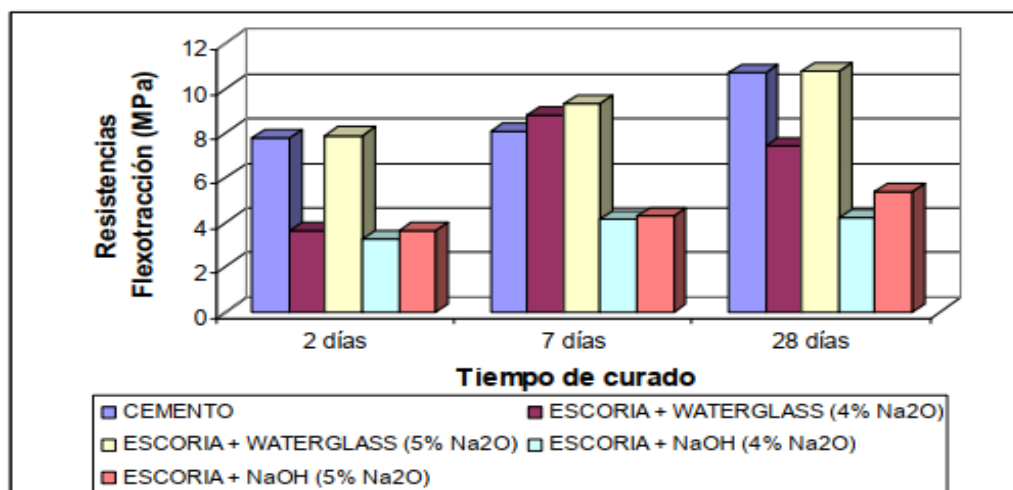
Fuente: (Puertas, Palacios, & Gutierrez, 2007)

Como podemos apreciar, la mezcla de control muestra mejor comportamiento en edades tempranas solo la muestra con silicato de sodio al 5% se le acerca con un valor superior a los treinta (30) mega pascales, pero a partir del séptimo día vemos como la mezcla de control y

las activadas con silicato al 4% y 5% casi se nivelan en valores cercanos a los cincuenta (50) mega pascales, esta situación se hace aún más evidente a los 28 días. Por otro lado, las mezclas en las que se incorporó el hidróxido de sodio no alcanzaron resistencias satisfactorias siendo superadas ampliamente por las mezclas con silicato de sodio.

De la misma forma al aplicar el ensayo de flexo tracción a las muestras los resultados se mantuvieron similares, demostrando que el activador más efectivo, en todas las edades, fue el silicato de sodio en una concentración del 5% tal como se muestra a continuación:

**Gráfico28:** *Resistencia al Flexo Tracción Vs Tiempo.*

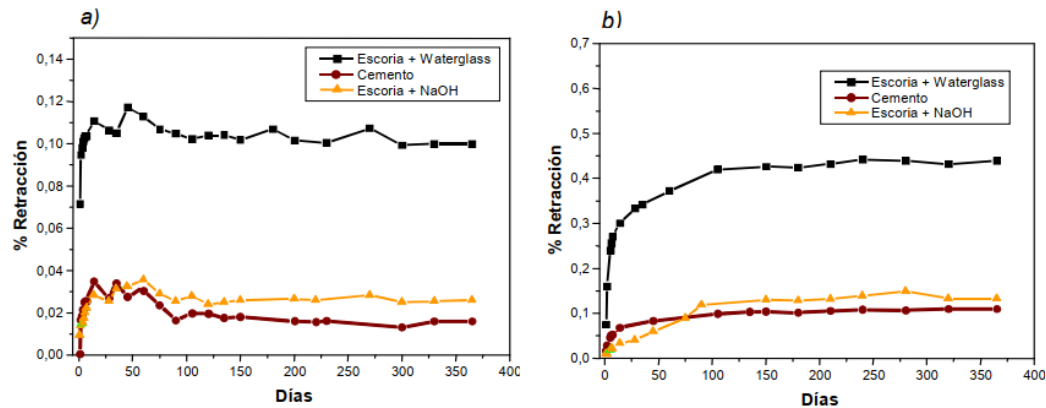


Fuente: (Puertas, Palacios, & Gutierrez, 2007)

Por último, pero no menos importante, analizaremos los resultados de dos pruebas, que, si bien no se habían tenido en consideración en análisis anteriores, son determinantes pues nos muestran cómo se comportan este tipo de muestras a lo largo de un periodo de tiempo. Estas son las pruebas de estabilidad de volumen y la de comportamiento frente a la carbonatación. En la primera se nos muestra la retracción o pérdida de volumen que tiene una muestra de mortero a lo largo de un periodo estipulado, en este caso el periodo de estudio es de un año.

Para la prueba se prepararon probetas de 2.5x2.5x28.7 cm teniendo como guía la norma europea UNE 80-112-89, comparando la retracción volumétrica a diferentes edades respecto a la inicial. En el desarrollo de esta práctica se sometió las muestras a humedades relativas diferentes. Los resultados aportados por las autoras son los siguientes:

**Gráfico 29:** Porcentaje de retracción según Humedad Relativa (99% & 50%)



Fuente: (Puertas, Palacios, & Gutierrez, 2007)

La grafica (a) corresponde a una humedad relativa del 99% y la grafica (b) corresponde a una humedad relativa del 50%, vemos como la humedad influye en la retracción de cada una de las mezclas pero lo mas notable es la alta retracción presentada por la mezcla activada que incorpora el silicato de sodio, recordemos que esta mezcla fue la que presento mejor comportamiento mecánico, comparando ambos comportamientos notamos que a medida que esta mezcla mejora su resistencia a la compresión se retrae hasta 6 veces más que la mezcla de control, para las autoras esta retracción está directamente ligada con la porosidad propia de la mezcla y a su principal producto de reacción, el gel CSH (silicato de calcio hidratado). solo quedaría por comprobar que la ceniza volante puede tener la misma susceptibilidad al ser activada con el silicato de sodio.

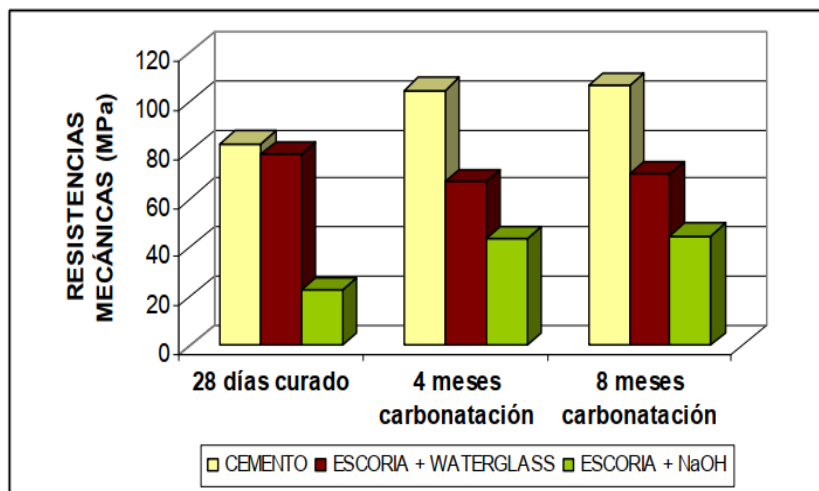
La prueba de durabilidad a su vez se dividió en dos apartados, en el primero se midió el comportamiento de las mezclas ante medios sulfáticos y agua de mar, el segundo el



comportamiento frente a la carbonatación. La carbonatación es conocida como el proceso químico en el que el dióxido de carbono presente en el aire reacciona con el óxido de calcio formando carbonato de calcio, en este proceso se produce un descenso en el pH permitiendo que cloruros presentes en ambientes salinos lleguen con mayor facilidad al acero, esta es la razón por la que se considera la carbonatación como precursor de patologías en el concreto. En este caso vamos a analizar los resultados del segundo pues la carbonatación es uno de los problemas más conocidos en el concreto.

La prueba se realizó en tres mezclas, una de control y dos de activación alcalina con hidróxido de sodio y silicato de sodio con concentración del 4% en ambos casos. Se elaboraron probetas cubicas de 3 cm de lado las cuales se curaron inicialmente durante 28 días, posteriormente se introdujeron en una cámara cerrada en la que se saturó con dióxido de carbono de dos a tres veces por día, estos son los resultados después de 8 meses:

**Gráfico 30:** *Resistencias Mecánicas Obtenidas.*



Fuente: (Puertas, Palacios, & Gutierrez, 2007)

El comportamiento descrito en la gráfica nos enseña que la muestra de control mantuvo un buen comportamiento pues su resistencia aumento respecto al dato inicial y se mantuvo en los meses posteriores, por el contrario, las mezclas activadas a pesar de presentar valores de resistencia aceptables, no fueron tan buenos como el de la mezcla de control. En el caso de la

mezcla con silicato de sodio se presentó un descenso en su resistencia en casi 10 mega pascuales entre el dato inicial y el dato tomado a los cuatro meses, luego de esto se mantuvo estable, por lo que podemos inferir que la carbonatación puede afectar sensiblemente las mezclas activadas con silicato de sodio, en este caso solo nos queda mediante pruebas comprobar si este comportamiento se repite en similar proporción en mezclas activadas con ceniza volante como material cementante.

**Conclusiones:** A pesar de que el material usado no fue la ceniza volante pudo comprobarse la similitud en el comportamiento mecánico entre esta y la escoria de alto horno, con ello no aseguramos que todo el tiempo se mantenga el mismo comportamiento pues harían falta más pruebas y ensayos en donde se los compare directamente bajo igualdad de condiciones de mezcla y curado.

Los ensayos realizados por las autoras tienen un componente importante que consiste en el tiempo de estudio del comportamiento de la muestra, anteriormente se había trabajado con proyectos cuyo tiempo máximo de estudio era de 90 días lo cual solo nos muestra la “etapa joven” del mortero, es interesante ver los cambios que produce la carbonatación en este tipo de mezclas activadas y sería más interesante hacerlas un poco más extensas puesto que los datos obtenidos de esta práctica pueden enseñarnos que sucede realmente con las mezclas a medida que envejecen en diferentes entornos.

Si bien se demostró que las mezclas activadas pueden estar a la altura de las mezclas convencionales en cuanto a su desempeño mecánico, y que su estabilidad le permite desempeñarse sin problemas en medios salinos y sulfurosos, con lo cual queda demostrada su durabilidad, hay un aspecto que, según lo analizado en este documento, resulta preocupante y es la retracción volumétrica que presentan las mezclas de activación alcalina, más concretamente las mezclas que incorporan el silicato de sodio o Wáter Glas, pues los porcentajes de retracción superaron con creces los mostrados por la muestra de control con cemento portland y la mezcla activada con hidróxido de sodio, siendo hasta 6 veces mayor. Con todo lo analizado podemos notar que para considerar el uso de una mezcla de activación alcalina es necesario tener un conocimiento total de las condiciones del proyecto puesto que el este tipo de mezclas “deben” ser pensadas para soluciones particulares.

**Autor 10:** Estefanía Robayo Núñez.

**Tema:** Comportamiento mecánico y durabilidad de morteros de cenizas volantes activadas alcalinamente.

**Desarrollo:** En este trabajo de investigación la autora se centra en el aprovechamiento de materiales de desecho, cenizas volantes, como respuesta a dos problemáticas, la primera la correcta disposición del material de desecho y la segunda la presentación de una alternativa ecológicamente viable que reemplace al cemento portland. Para ello se estudian cenizas que provienen de la industria textilera, lo cual marca una diferencia ya que las materias primas vistas con anterioridad provienen de la industria energética y metalúrgica, con esto podemos notar inicialmente la variedad de orígenes de la que disponemos para obtener la materia prima, y teniendo en cuenta que son materiales de desecho se puede inferir que hay cierto beneficio económico respecto al cementante tradicional.

para el desarrollo de los ensayos se plantea elaborar mezclas con en material cementante debidamente caracterizado con el fin de verificar que cumple con la condición de tener escasa presencia de cal y una presencia de óxidos básicos por encima del 70% como se describen las cenizas volantes tipo “F”. los activadores seleccionados don el hidróxido de sodio y el silicato de sodio los cuales se incorporan a la mezcla en distintas concentraciones con el fin de determinar la relación entre estos y las propiedades mecánicas de la mezcla final. Adicional a los activadores se agrega un aditivo conocido comopuzzolith 460 N, es la única mezcla de activación estudiada a la que se le agrega un aditivo lo cual hace aún más llamativo los resultados. El aditivo se usa con el fin de mejorar la plasticidad de la mezcla y con ello su manejabilidad. Los pasos seguidos por la autora son:

- Caracterización de materia prima (ceniza volante tipo “F”).
- Definición de las mezclas.
- Preparación de activadores.
- Preparación de las mezclas de activación alcalina.
- Ensayo de resistencia a la compresión y flexión.
- Resistencia a medios agresivos.
- Resistencia a altas temperaturas.
- Presentación de resultados.

El primer paso consistió en realizar la caracterización química de la materia prima a usar, esto teniendo en cuenta que proviene de la industria textilera. Las industrias con las cuales se venía trabajando esta materia prima esencialmente era la industria energética y metalúrgica, pero, como dato adicional la autora realiza un aporte, el cual fue publicado por el centro de investigaciones del carbón en el año de 1996 en el que se relacionan 25 empresas nacionales y su producción de cenizas volantes estimadas por año, el total de cenizas volantes para esa fecha se estima en 25.852 toneladas, lo que nos da una idea de cuanta materia pueden estar disponibles para su uso. Cabe aclarar que la caracterización química es un paso importante pues ella determina la utilidad de esta materia prima. En el caso de la ceniza seleccionada para el trabajo de investigación estos fueron los datos obtenidos:

**Tabla 26:** *Composición Química de Materia Prima.*

<b>MUESTRA</b>	<b>Ceniza Coltejer</b>	<b>Ceniza Coltejer Pasante 75 micras</b>	<b>Variación %</b>
<b>LOI</b>	7,26	6,14	15,4
<b>SiO<sub>2</sub></b>	43,372	45,000	3,8
<b>TiO<sub>2</sub></b>	1,247	1,231	1,3
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	29,071	28,858	0,7
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	5,926	5,893	0,6
<b>Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub></b>	0,025	0,020	20,0
<b>MgO</b>	2,300	2,274	1,1
<b>CaO</b>	<b>6,985</b>	6,547	6,3
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	1,517	1,448	4,5
<b>K<sub>2</sub>O</b>	1,594	1,289	19,1
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,088	0,081	8,0
<b>SO<sub>3</sub></b>	0,025	0,637	2448,0
<b>V<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,112	0,114	1,8
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,041	0,045	9,8
<b>SrO</b>	0,059	0,048	18,6
<b>ZrO<sub>2</sub></b>	0,015	0,013	13,3
<b>BaO</b>	0,278	0,275	1,1
<b>NiO</b>	0,020	0,024	20,0
<b>CuO</b>	0,021	0,020	4,8
<b>ZnO</b>	0,035	0,034	2,9
<b>PbO</b>	0,009	0,009	0,0
<b>HfO<sub>2</sub></b>	0,001		100,0

Fuente: (Robayo, 2013)

**Tabla 27:** *Resumen y Clasificación de Ceniza.*

PARAMETRO	RESULTADOS	NORMA CLASE F
<b>Requerimientos Químicos</b>		
Dioxido de Silicio (SiO <sub>2</sub> ) + Oxido de Aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )+Oxido de Hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) min	%	78.369 70
Trioxido de Asufre (SO <sub>3</sub> ), max	%	0.025 5
Contenido de Humedad, max	%	0.280 3
Perdida por ignición, max	%	2.180 6
<b>Requerimientos Físicos</b>		
Densidad		2.091
Finura, Cantidad Retenida en el tamiz 45µm (No 325), max, %	%	77.79 34
Indice de Actividad Resistente		
Con Cemento Portland, a 7 días, min, porcentaje de control		84.75 75
Con Cemento Portland, a 28 días, min, porcentaje de control		101.28 75
Requerimiento de Agua, max, porcentaje de control		123.97 105

Fuente: (Robayo, 2013)

Como se puede observar en las tablas anteriores, la ceniza seleccionada cumple con los parámetros para ser usada como material cementante, los niveles en conjunto de dióxido de silicio, oxido de aluminio y óxido de hierro están por encima de 70 tal como lo sugiere la norma ASTM C618.

Para los activadores se siguió el mismo protocolo de premezcla del NaOH debido a la reacción exotérmica presentada por este compuesto solido al mezclarse con el agua destilada. Al igual que en las experiencias vistas con anterioridad la autora preparó el NaOH a distintas concentraciones, esto con el fin de realizar ensayos previos y trabajar con la concentración que presentara mejor resultado. Cada mezcla se preparó con concentraciones molares de NaOH definidas en 8M, 10M y 12M, hasta este punto no es clara la relación AA/CV la cual veníamos identificando como uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta. Luego de elaborar las muestras de mortero se siguen las indicaciones de las normas INVE 323 y NTC 220 y se elaboran probetas cubicas de 5 cm de lado, en cuanto a la activación de las mezclas se introducen las probetas en un horno a una temperatura de 60°C por un periodo de dos días tras los cuales se realiza el primer ensayo de resistencia, posteriormente se repite los ensayos a los 7 y 28 días. Los resultados de estas muestras previas son:

**Tabla 28:** Resistencia a la Compresión.

MEZCLA	Resistencia a Compresión (Mpa)		
	2 Días	7 Días	28 Días
8M	12,864	16,955	19,342
10M	13,593	20,666	25,014
12M	9,445	9,551	15,403

Fuente: (Robayo, 2013)

En este caso como se indica en la tabla, las mejores propiedades mecánicas las presento la mezcla con concentración 10M, por lo tanto, las todas las muestras de mortero activado a ensayar contarán con esta concentración. El paso a seguir fue definir las mezclas de mortero, para ello la autora escogió 4 tipos de mezcla de activación alcalina y dos mezclas de control con cemento portland tipo 1 y 3. Las mezclas se definieron de la siguiente manera:

- **Mezcla 1:** Mezcla de cemento portland tipo III.
- **Mezcla 2:** Ceniza volante + NaOH 100%.
- **Mezcla 3:** Ceniza volante + 75%NaOH + 25%  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ .
- **Mezcla 4:** Ceniza volante + 50%NaOH + 50%  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ .
- **Mezcla 5:** Ceniza volante + 25%NaOH + 75%  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ .
- **Mezcla 6:** Mezcla de cemento portland tipo I.

Se resalta que en el grupo de mezclas seleccionado para la realización de la experiencia no se incluyó uno con 100% de silicato de sodio o wáter glass, esto se debe a que en una experiencia previa el silicato de sodio no mostro un buen comportamiento pues por un lado su viscosidad no permitió realizar una mezcla adecuada de los componentes de la misma y termino endureciéndose antes de que se realizara completamente la incorporación de todos los componentes, por lo tanto las mezclas que incorporen este activador deben tener un porcentaje moderado y preferiblemente combinarlo con NaOH que presenta mejores valores en cuanto a la fluidez. Como se mencionó en un principio a las mezclas se les incorporo un aditivo con

el fin de mejorar la trabajabilidad, a continuación, se muestra la dosificación seleccionada para cada una de las mezclas:

**Tabla 29:** *Dosificaciones de Mezcla Activada.*

MATERIAL	MEZCLAS					
	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5	Mezcla 6
Cemento Tipo I	-	-	-	-	-	500
Cemento Tipo III	500	-	-	-	-	-
Ceniza Volante	0	500	500	500	500	-
Arena	1375	1375	1375	1375	1375	1375
Agua	295	-	22.5	45	67.5	295
NaOH	-	300	225	150	75	-
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	-	-	52.5	105	157.5	-
Aditivo Pozzolite 460 N	20	20	20	20	20	20

Fuente: (Robayo, 2013)

Estas mezclas tuvieron el mismo tiempo de curado bajo las mismas condiciones que las mezclas con las que se controló la concentración molar de NaOH, se dispusieron en las mismas probetas y se ensayaron a los 2, 7, 28 y 56 días. A continuación, se presentan los resultados correspondientes a los ensayos de resistencia a la compresión para cada una de las mezclas activadas:

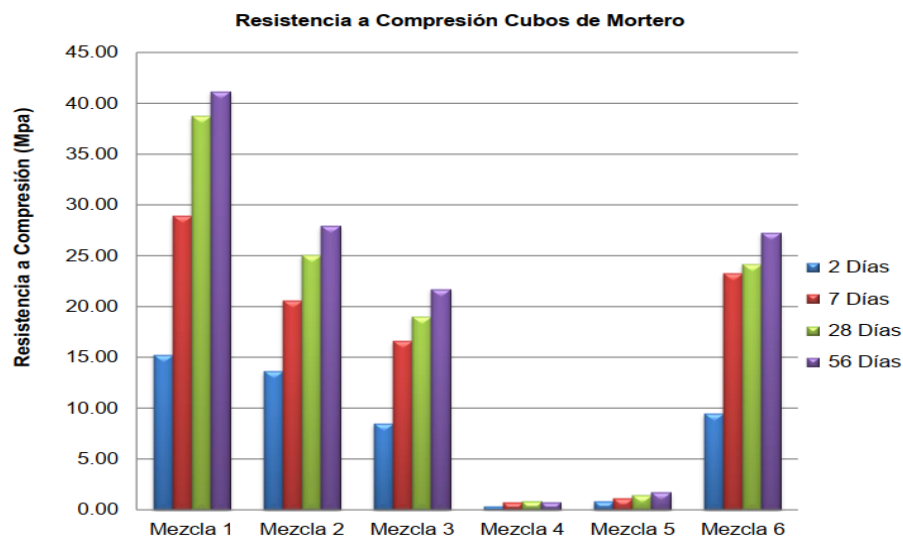
**Tabla 30:** *Resultado Resistencia a la Compresión.*

MEZCLA	Resistencia a Compresión (Mpa)			
	2 Días	7 Días	28 Días	56 Días
Mezcla 1	15.243	28.926	38.726	41.102
Mezcla 2	13.653	20.555	25.025	27.883
Mezcla 3	8.480	16.597	18.947	21.716
Mezcla 4	0.277	0.677	0.768	0.731
Mezcla 5	0.592	0.723	1.072	1.086
Mezcla 6	9.447	23.277	24.147	27.222

Fuente: (Robayo, 2013)

Los datos mostrados señalan claramente que la mezcla con mejor comportamiento durante los ensayos fue la mezcla número uno correspondiente a la mezcla de control con cemento portland tipo uno. Las mezclas activadas con mejor comportamiento en su orden fueron las mezclas 2 y 3, de estas solo la numero dos activada solo con NaOH cumplió con lo dispuesto por la norma NTC 121 de acuerdo a las resistencias mínimas de 15 y 24 mega pascales para mezclas a los 7 y 28 días respectivamente. Si bien la mezcla numero 3 cumplió con la resistencia mínima a los 7 días, a los 28 días no completo los 24 Mpa. Por otro lado, se observa que las mezclas 4 y 5 no tuvieron un buen comportamiento, con valores de resistencia a la compresión casi nulos se puede inferir que no haber tenido en cuenta la proporción entre activadores y material cementante afecto de manera sensible la activación de la mezcla. Otro aspecto del cual no se hace mención es del módulo del silicato de sodio que se define como  $\text{SiO}_2/\text{NaO}$ , ya en el trabajo correspondiente al primer autor se había tratado la importancia de este valor para la activación y la resistencia a la compresión. En el siguiente grafico se resume el comportamiento de las mesclas:

**Gráfico 31:** *Resistencias a Compresión Cubos de Mortero.*



Fuente: (Robayo, 2013)

Las pruebas de resistencia a la flexión se realizaron bajo igualdad de condiciones que las de resistencia a la compresión, con la salvedad que para este caso se elaboraron probetas de



4x4x16 cm a las cuales se les aplico una carga en la mitad según lo dispuesto en la norma NTC 120. Los resultados fueron los siguientes:

**Tabla 31:** *Resultado resistencia a la flexión.*

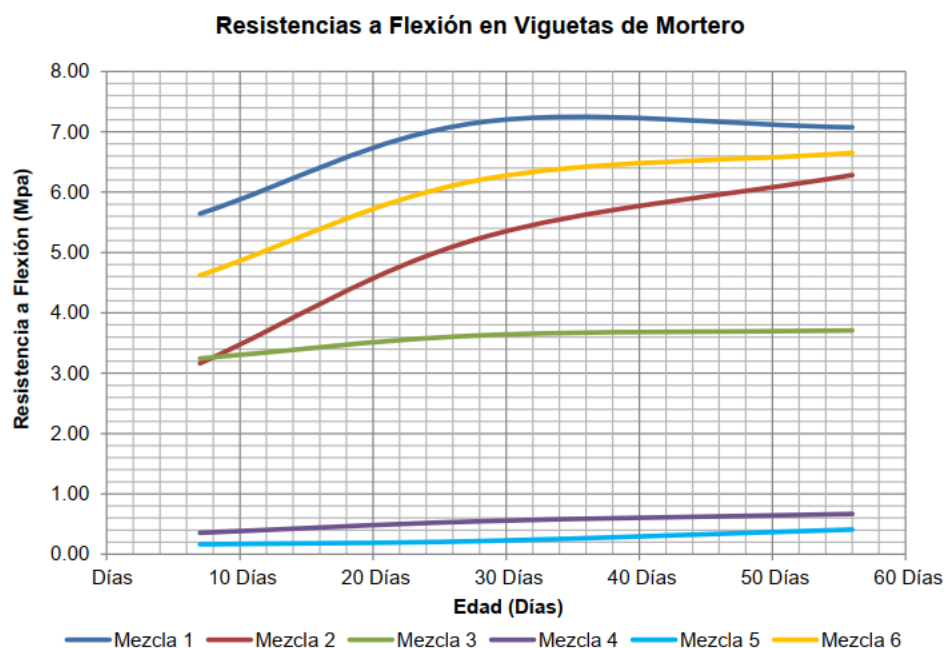
MEZCLA	Resistencia a Flexión (Mpa)		
	7 Días	28 Días	56 Días
Mezcla 1	5.643	7.156	7.075
Mezcla 2	3.162	5.234	6.284
Mezcla 3	3.244	3.626	3.708
Mezcla 4	0.354	0.545	0.668
Mezcla 5	0.164	0.218	0.409
Mezcla 6	4.621	6.202	6.652

Fuente: (Robayo, 2013)

Como se puede apreciar, los resultados, en cuanto al desempeño, son muy similares a los arrojados por el ensayo de resistencia a la compresión, la mezcla número uno sigue siendo la de mejor comportamiento seguida muy de cerca por la muestra número 6, también de control, y la mezcla número dos, activada solo con hidróxido de sodio, presenta el mejor comportamiento en los dos ensayos siendo superior a la mezcla número 3, en el caso del ensayo de resistencia a la flexión cumplidos los 56 días se ubicó muy cerca de las mezclas de control de cemento portland tipo I y III por lo que hasta este punto puede ser considerada como una buena opción de mezcla de activación alcalina.

En cuanto a las mezclas 4 y 5, en las que se usaron en distintas proporciones los dos activadores, presentaron igualmente valores muy bajos en comparación a las demás mezclas por lo que se infiere que el proceso de activación del material cementante no se llevó a cabo de manera satisfactoria por lo que debería verificarse que factor afecto negativamente las propiedades de la mezcla. A continuación, el resumen del comportamiento de las mezclas en el ensayo de flexión:

**Gráfico 32:** Comportamiento de Mezclas – Flexión.



Fuente: (Robayo, 2013)

Una prueba más realizada por la autora y que resulta interesante en cuando al desempeño que puede mostrar una mezcla de activación alcalina es la prueba de resistencia a elevadas temperaturas, en ella se expone a las mezclas curadas durante un periodo de 28 días a temperaturas de 400°C y 700°C por un tiempo de dos horas, finalizado este tiempo se las extrae del horno y se dejan en reposo, el paso siguiente es someter las probetas a los ensayos de resistencia a la compresión y flexión, los resultados aportados tras la realización de esta práctica son:

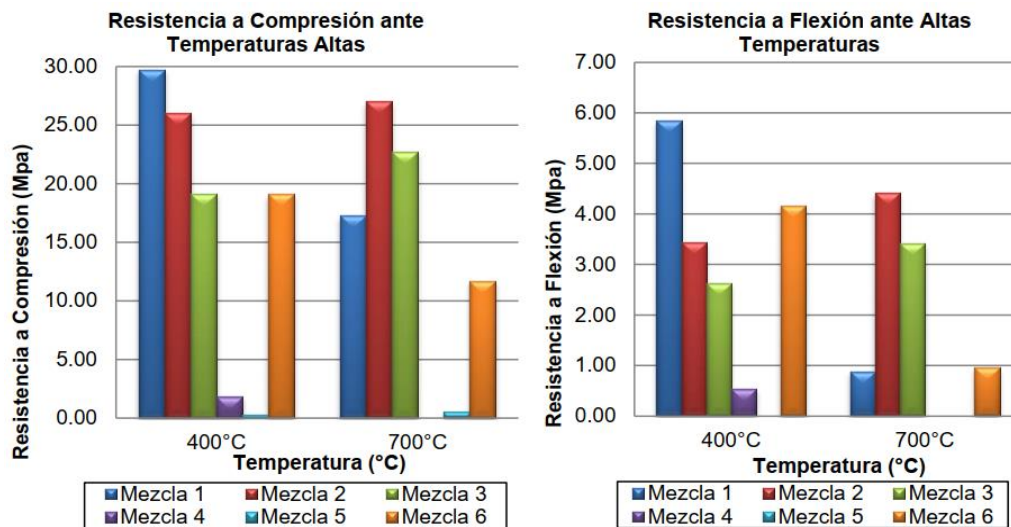
**Tabla 32:** Resultado Resistencia a la Compresión y Flexión a 400°C y 700°C.

Ensayo		MEZCLAS					
		Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5	Mezcla 6
<b>Resistencia compresión (Mpa)</b>	Temperatura de 400°C	32,366	26,039	19,144	1,827	0,886	21,011
	Temperatura de 700°C	17,236	29,193	22,753	0,000	0,000	11,705
<b>Resistencia Flexión (Mpa)</b>	Temperatura de 400°C	5,835	3,435	2,631	0,545	0,000	4,158
	Temperatura de 700°C	0,879	4,403	3,408	0,000	0,000	0,954

Fuente: (Robayo, 2013)

En este caso podemos notar un fenómeno particular y este consiste en el incremento de las propiedades mecánicas de las mezclas de activación alcalina tras su exposición a una alta temperatura, lo cual es contrario al comportamiento de las mezclas de control de cemento portland que disminuyeron sustancialmente su resistencia tanto a la compresión como a la flexión. Las muestras 4 y 5, como se venía mostrando anteriormente, no tuvieron un buen desempeño llegando incluso a valores nulos tras la exposición a 700°C. El resumen de la prueba es el siguiente:

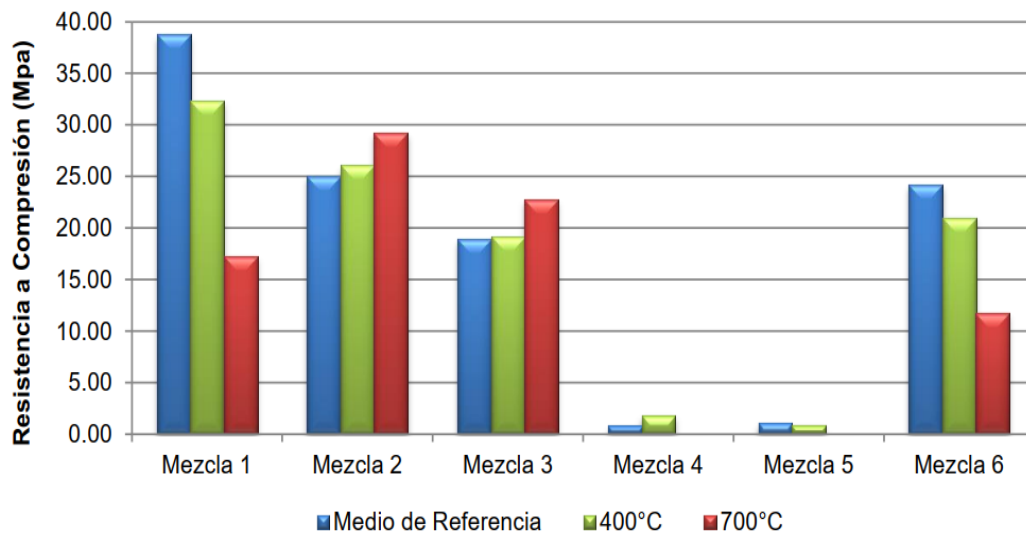
**Gráfico 33:** Resistencias Mecánicas Tras Exposición a Altas Temperaturas.



Fuente: (Robayo, 2013)

Como se puede notar, las mezclas de activación alcalina superaron sus propios resultados tras la aplicación de temperatura, lo cual nos demuestra que la temperatura es determinante en el curado de este tipo de muestras. A continuación, podemos observar la evolución de cada una de las mezclas antes y después de ser sometidas a altas temperaturas:

**Gráfico 34:** Resistencias a compresión comparación con mezclas no expuestas a Altas Temperaturas.



Fuente: (Robayo, 2013)

**Conclusiones:** Como dato interesante de este trabajo rescatamos la variedad de orígenes que pueden tener las cenizas volantes, recordemos que al ser un material de desecho para las industrias se esperaba que el costo de adquisición de estas sea mínimo, sin embargo, para garantizar el correcto desempeño de las mezclas es necesario en todo momento realizar la caracterización del material a fin de conocer y comprobar que la composición química de la ceniza es adecuada.

El proceso de activación de una mezcla de mortero de ceniza volante requiere de mucho cuidado, hay parámetros claros que se deben respetar si se quiere tener un buen resultado, en el desarrollo de este trabajo de investigación se notó como la autora presento resultados que consideramos negativos pues no llegaron a alcanzar los valores mínimos establecidos por las normas mencionadas. Con los datos presentados por la autora se puede inferir que las mezclas

no alcanzaron a activarse, posiblemente la concentración de los activadores y el módulo del silicato de sodio constituyeron la fórmula para el bajo desempeño de las mezclas 4 y 5.

Por último, destacaos el comportamiento que las mezclas activadas alcalinamente presentan frente a la exposición a altas temperaturas lo cual termina por favorecer el proceso de curado mejorando las propiedades mecánicas de las mezclas. Resistir y presentar mejor comportamiento que las mezclas convencionales, frente a temperaturas altas, amplía el campo de aplicación y uso para este tipo de mezclas. El punto negativo, sin lugar a duda, es que, para fines prácticos, este tipo de temperaturas solo se pueden alcanzar en medios controlados (horno) y en aplicaciones específicas como en la fabricación de elementos como vigas, adoquines entre otros. En las condiciones normales de una obra es seria algo difícil de implementar.

## 9. ANALISIS GENERAL

Habiendo explorado las diferentes metodologías aplicadas por cada uno de los autores seleccionados se pueden establecer ciertas similitudes que permiten consolidar un diseño de mezcla de mortero de activación alcalina digno de ser comparado con un mortero convencional. Es claro que las proporciones de los materiales usados, así como su composición química, tienen una alta incidencia en el comportamiento reológico de la mezcla, esto sin dejar de lado el proceso de activación en el que se mostró claramente que la activación alcalina es compatible a temperaturas ambiente, pero, en lo que a practicidad se refiere, hay aspectos por mejorar pues en dichas condiciones la activación es muy “lenta” y los resultados no siempre son los esperados.

A continuación, se presenta la relación de los datos obtenidos de cada autor seleccionado, en ella se compara desde la selección de los materiales de la mezcla alcalina, sus proporciones, concentraciones y las resistencias obtenidas tras el proceso de activación.

**Tabla 33:** *Resumen Resultados por Autor.*

	Mezcla sob	Ceniza	Activador	Concentración	AA/ CV	Concentración molar	Modulo SiO <sub>2</sub> /Na <sub>2</sub> O	Temperatura curado °C	Humedad relativa	Resistencia a compresión 28 días Mpa
<b>Autor 1</b>		F	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	7%	0.4	----	1.5	50	-----	75.81
<b>Autor 2</b>		F	NaOH	-----	0.4	8M	-----	60	-----	25
<b>Autor 3</b>		F	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> /NaOH = 1.5		0.55	8M	1.5	80	-----	16.5
<b>Autor 4</b>	2	F	NaOH	-----	0.4	----	-----	Ambiente	-----	25.02
<b>Autor 5</b>		F	NaOH	-----	0.4	6M	-----	70	-----	3.92
<b>Autor 6</b>		F	NaOH	-----	0.5	8M	-----	80	99%	41.83
<b>Autor 7</b>	1	F	0%Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> /30%NaO	-----	0.35	12M	-----	80	-----	35.52
<b>Autor 8</b>	5	F	NaOH	-----	0.28	8M	-----	28	-----	34.2
<b>Autor 9</b>	2	escoria	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	4%	-----	-----	-----	Ambiente	-----	68
<b>Autor 10</b>	2	F	NaOH	-----	0.4	10M	-----	60	-----	25.025

Fuente: Elaboración Propia

Tal como se muestra en la tabla 33, los resultados más notables fueron obtenidos por los autores del sexto trabajo investigado, estos manejaron variables muy importantes, entre estas el área superficial de las partículas y adicional la humedad relativa, por lo tanto, el diseño de mezcla de activación alcalina producto del trabajo de investigación realizado incorporó, en la medida de lo posible, los parámetros que resultaron más convenientes y con los que se garantizó un comportamiento mecánico similar o superior al presentado por una mezcla convencional de CPO, aclarando que en la práctica se pueden dar resultados adversos, esto desde teoría por medio de la aplicación de los conocimientos obtenidos en cada uno de los trabajos seleccionados.

### **9.1.Proposición de mezcla activada**

El diseño de mezcla de activación alcalina que propuesto está basado en la teoría, sustentado por las experiencias relatadas en cada una las distintas fuentes consultadas, tiene como material cementante la ceniza volante tipo F, esto siguiendo las indicaciones ya vistas de la norma. El activador alcalino seleccionado es el hidróxido de sodio en una concentración molar de 8M. la relación AA/CV según el desempeño de las mezclas es de 0.4. la a relación material cementante arena se deja tal lo dispuesto en la norma (1;2,75). La temperatura de curado es sin lugar a duda el factor más determinante en este tipo de mezclas, según lo visto, las temperaturas que favorecen el proceso de activación están en el rango entre los 65°C y los 85°C, en este caso las aplicaciones en las que sean posibles el uso de la mezcla activada empiezan a limitarse, por otro lado, también pudimos comprobar que las reacciones a temperatura ambiente son posibles pero la velocidad de activación es determinante, junto con el porcentaje de retracción del material el cual está relacionado con la fluencia, y esta a su vez con el área superficial de la ceniza volante. Entonces es necesario partir del uso que pretendemos darle a la mezcla activada, por lo cual en forma didáctica definiremos el uso de la mezcla como mortero de activación alcalina para la elaboración de elementos prefabricados como viguetas. Para la elaboración de dichos elementos suponemos un material (CV) con un área superficial cercana a los 3 m<sup>2</sup>/g llegando a tener una fluencia teórica del 85% y una temperatura de activación de 75°C.

Se prepara la solución de hidróxido de sodio o soda caustica en una concentración 8 Molar en un litro de agua, partiendo de que la masa molar de este es de 39.997 g/mol hallamos la cantidad necesaria por litro.

$$8 \text{ mol} * 39,997 \text{ g/mol} \approx 320 \text{ gramos de NaOH.}$$

la dosificación material para la elaboración de la mezcla activada parte de la suposición de la activación de 50 kilogramos de ceniza volante, peso estándar en el que se encuentran los bultos de cemento portland tipo I, esto con el fin de realizar la comparación entre los dos tipos de mezcla. Siguiendo la recomendación de los autores seleccionados la relación agua material cementante será de 0,2. La dosificación propuesta es la siguiente:

**Tabla 34:** *Dosificación de Mezcla Activada Propuesta*

<b>Material</b>	<b>Cant.</b>
<b>Ceniza Volante (Kg)</b>	<b>50</b>
<b>NaOH (Kg)</b>	<b>10.008</b>
<b>Arena (Kg)</b>	<b>137.5</b>
<b>Agua pasta(L)</b>	<b>20</b>
<b>Agua Absa(L) 8.2%</b>	<b>11.275</b>

Fuente: Elaboración Propia

Con esta mezcla de activación alcalina se espera que en el ejercicio práctico se pueda alcanzar resistencias a la compresión del orden de 38 a 43 mega pascales y de flexión en el rango de los 5 a 7 mega pascales.

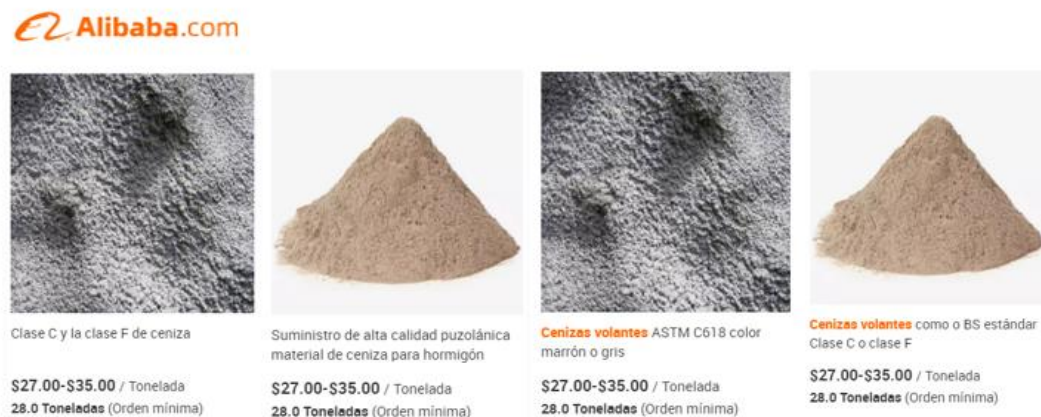


## 10. FACTIBILIDAD ECONÓMICA.

Como paso final en este trabajo de investigación, se presentan las cifras relacionadas con la producción de morteros de activación alcalina, concretamente para la mezcla propuesta. La cual se comparó con una mezcla convencional de CPO a fin de verificar que estas pueden ser elaboradas en un rango de precio que resulte competitivo.

Como se ha venido mencionando, las cenizas volantes constituyen un material de desecho a nivel industrial que puede tener múltiples orígenes, pues en la actualidad no solo las cenizas de la industria energética son usadas con fines relacionados a la construcción. El gran desafío en el manejo de este material radica en la recolección y disposición del mismo, hay que considerar que este material debe cumplir con unas características físicas y composición química para ser considerado apto para ser activado, esto requiere de estudios que se pueden traducir en términos de dinero, lo cual hace más complejo estimar los valores asociados. En lo que respecta a este trabajo de investigación se tomaron valores de referencia de diferentes fuentes para cada uno de los materiales necesarios para la elaboración de la mezcla propuesta, a pesar de que se realizó la gestión para tener el valor de la ceniza volante por parte de un proveedor nacional, no se obtuvo respuesta por lo que se decidió tomar valores de referencia encontrados en la web, algunos de los resultados encontrados en un portal consultado se muestran a continuación:

**Figura 4:** *Precios estimados para ceniza volante tipo F*




Fuente: (<https://spanish.alibaba.com/>, 2020)

Al realizar el cambio a moneda local encontramos que la tonelada de ceniza volante tipo “F” ofrecida en el portal se encuentra en un rango entre los \$97389.00 y los \$126245.00, esto partiendo de una tasa de cambio de \$3607.00 por cada dólar estadounidense. De esta manera llegamos a que el precio mínimo por kilogramos de ceniza volante es de \$97.38.


En el caso del hidróxido de sodio se realiza la aclaración de que la venta al público cuenta con restricción del ministerio de justicia y está limitada a cinco kilogramos al mes, para ello se consultaron tres proveedores los cuales ofrecían el NaOH en presentación de escamas o pellets con una pureza del 98%. Los valores aportados por los proveedores con precios más competitivos son los siguientes:

**Figura 5:** Cotización NaOH Químicos Mandarin.



PRODUCTOS	PRESENTACIONES	PRECIO
SODA CAUSTICA (HIDROXIDO DE SODIO)	PAQUETE POR 5 KG	\$30.000
SODA CAUSTICA (HIDROXIDO DE SODIO) SOLO SE VENDE CON PERMISO DEL MINISTERIO DE JUSTICIA Y DEL DERECHO	BULTOP POR 25 KG	\$130.000

**Figura 6:** Cotización NaOH Químicos Campota.

		FORMATO COTIZACIÓN CLIENTES		QVQ-P02-F18	
				V 2	
				8-Jul-20	
				1 de 1	
CLIENTE ANDRÉS ALFONSO OSORIO ROSADO		NIT o CC 1066063206		COTIZACIÓN No. C69-00027	
CONTACTO		VENDEDOR WILLIAM RUIZ		FECHA 25-11-2020	
DIRECCIÓN		CIUDAD		TEL:	
PRODUCTO	ORIGEN	PRESENTACIÓN	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
1 SODA CAUSTICA (HIDROXIDO DE SODIO)	CHINO	KILO	5	4.622	23.110

El proveedor seleccionado de acuerdo al precio es químico Campota ya que el precio por kilogramo es de \$ 4622.00 frente a los \$5200 de la mejor opción del otro competidor.

Para los valores de arena y cemento se consultó portales de almacenes de cadena especializados, los valores se muestran a continuación:

**Figura 7:** Cotización Arena para Mortero.

Producto	Precio	Disponibilidad
BLF Arena de Río 40kg	\$6.900 UND	✓ Disponible para despacho ✓ Disponible para retiro
BLF Arena Lavada 40 Kg	\$8.600 UND	✓ Disponible para despacho ✓ Disponible para retiro
BLF Arena de Peña 40kg	\$7.500 UND	✓ Disponible para despacho ✓ Disponible para retiro

Fuente: (<https://www.homecenter.com.co>, 2020)

**Figura 8:** Cotización Arena para Mortero.

Producto	Precio por KG	Precio Total
AGREGADOS SAN JAVIER Arena de Peña Zarandeada X Bt 40 Kg	\$220	\$8,790

Fuente: (<https://www.easy.com.co/c/ferreteria/>, 2020)

El precio más conveniente para este material es ofertado por el proveedor Homecenter, el costo por kilogramo de material es de \$172.5.

En cuanto al cemento portland tipo I los valores aportados por los mismos portales son:

**Figura 9:** Cotización Cemento Gris Tipo I.

Producto	Calificación	Precio (USD)
Argos Cemento Argos Gris 50kg	★★★★★ (15)	\$24.500 UND
Ultracem Cemento Ultracem Uso General Gris 50kg	★★★★★ (6)	\$28.900 UND
Cemex Cemento Cemex Super Resistente 50kg	★★★★★ (9)	\$26.000 UND

Fuente: (<https://www.homecenter.com.co>, 2020)

**Figura 10:** Cotización Cemento Gris Tipo I.

Producto	Calificación	Precio (USD)
Cemento Tipo I Gris x50 kg	★★★★★ (2)	\$490.00 / KG <del>\$26,800</del> \$24,500
Cemento Gris Tipo 1 Cemex Súper Resistente 50kg		\$533.80 / KG <del>\$26,690</del>

Fuente: (<https://www.easy.com.co/c/ferreteria/>, 2020)

Para la opción del cemento gris se seleccionó el ofrecido por cementos Argos el cual tiene un costo de \$490 por kilogramo. El ultimo material a considerar es el agua para el cual calculamos el costo por litro partiendo del costo promediado por metro cubico para la ciudad de Santa Fe de Bogotá es de \$2210.00, por lo tanto, el litro de agua queda estimado en \$2.21.

En la tabla 35 se muestra la comparativa en cuanto a los precios de producción entre el diseño de mezcla para mortero de activación alcalina propuesto y una mezcla convencional CPO conocida como 1:3, esta última es una de las mezclas de mayor uso tanto para revoque como pega de elementos de mampostería. Para el análisis de precios se optó por comparar las mezclas en función de sus materiales cementantes concretamente en la cantidad de un kilogramo y los demás materiales acordes a este haciendo uso de la regla de tres.

**Tabla 35:** Comparativa Costos de Producción.

Material	Mezcla Conv. CPO		Mezcla Activada CV	
	Cant.	Costo \$	Cant.	Costo \$
Ceniza Volante (Kg)	-		1	97.38
Cemento Portland (Kg)	1	490.00	-	
NaOH (Kg)	-		0.20	925.14
Arena (Kg)	3	526.50	2.75	482.63
Agua (L)	1	2.21	0.63	1.38
		1018.71		1506.53

Fuente: Elaboración Propia

A pesar de que en la comparativa de precios no se tuvieron en cuenta otros factores como transporte y mano de obra, las cifras nos dan una idea clara de que aun siendo la ceniza volante un material de desecho, el costo de elaboración de un kilogramo de esta, para una mezcla activada alcalinamente, supera en \$487.82 a la mezcla convencional de cemento portland, lo

cual es una clara desventaja al representar un aumento del 47.88%, y siendo la economía un factor determinante en el desarrollo de cualquier proyecto constructivo, las opciones de ser considerada como opción de reemplazo a las mezclas convencionales es limitada.

Cabe aclarar que los resultados están ligados a una selección de precios mostrada en un portal web a nivel internacional, por lo cual, sería necesario revisar si a nivel local los costos de obtención de ceniza volante por tonelada mantienen el mismo rango de precios. Adicionalmente, lo largo del trabajo de investigación se pudo comprobar el buen desempeño que presentaron este tipo de mezclas ante la exposición a elevadas temperaturas, por lo tanto, dependiendo del uso que se le pretenda dar este tipo de mezclas puede competir con las mezclas convencionales, esto de acuerdo a que en proyectos especiales la variable económica no sería la prioridad.

Por último, se debería considerar la durabilidad del material, de acuerdo a lo desarrollado en el trabajo de investigación este tipo de mezclas presentan un buen comportamiento ante medios agresivos en donde las mezclas convencionales son deficientes, esto permite inferir que su durabilidad en el tiempo es superior y por lo tanto, al considerar la variable “vida útil”, los costos de producción pueden resultar convenientes al ser contrastados contra el beneficio que implica que las estructuras o elementos elaborados con este tipo de mezclas necesiten menos mantenimiento. sería interesante realizar el ejercicio de comparar los costos relacionados con el mantenimiento en una estructura construida con una mezcla convencional versus una estructura con una mezcla de activación alcalina.

## 11. CONCLUSIONES GENERALES

Son muchos los factores que intervienen en un diseño de mezcla de activación alcalina, como enseñanza encontramos que existe un delicado equilibrio entre cada uno de los materiales seleccionados (activadores y material cementante) que debe respetarse. A diferencia de las mezclas de mortero convencional las mezclas de activación alcalina tienen un grado de exigencia mayor.

El hecho de que las mezclas de activación alcalina dependan de una temperatura superior a la temperatura ambiente en la mayoría de los casos analizados nos plantean la necesidad de invertir en el desarrollo de estas mezclas, más cuando se las plantea como opción de material de construcción y teniendo en cuenta las ventajas que ofrece la competencia.

Si bien desde la teoría se puede estimar cierto beneficio con la elaboración de mezclas de activación alcalina trabajar con químicos que pueden resultar nocivos necesita de una preparación previa, el personal a cargo de la realización de este tipo de mezclas debe estar capacitado y contar con atención al detalle, ya mezclar los materiales como habitualmente se hace en obra no garantiza que se dé la activación.

La variación en los resultados vistos a lo largo del desarrollo del trabajo de investigación realizado, nos lleva a entender la importancia en la normalización de este tipo de mezclas, hasta el momento solo el RILEM es quien lleva a cabo esta labor y alrededor del mundo son muchos los que necesitan tener una nueva opción, segura y amigable con el planeta.

Los datos presentados como diseño de mezcla final incorporan los parámetros resultaron más convenientes a lo largo del proceso de investigación. Se aclara que, tal como se planteó con desde el principio de este documento, el diseño de mezcla de mortero presentado este guiado desde la teoría y se deja a disposición de quien considere su ejecución en las condiciones planteadas para su estudio y comprobación de sus propiedades ya que por consecuencias propias de la pandemia no se pudo llegar al punto de ejecución y ensayo de la mezcla en laboratorio.

## 12. BIBLIOGRAFÍA

- ARQHYS. (2017). Muro pantalla. Equipo de colaboradores y profesionales de la revista ARQHYS.com. ARQHYS.
- BİLİM, C. (2002). *utilización de una ceniza volante de alto contenido en cal en el hormigón y su comportamiento frente a curados acelerados*. turquia .
- bloques cando S.A. (2005). Obtenido de <https://bloquescando.com/materiales-de-construccion-la-arena/>
- COLOMBIANA, N. T. (24 de 11 de 1999). MINISTERIO DE EDUCACION. Obtenido de [https://www.mineduccion.gov.co/1621/articles-96894\\_Archivo\\_pdf.pdf](https://www.mineduccion.gov.co/1621/articles-96894_Archivo_pdf.pdf)
- development, H. w. (2019). *How we drive sustainable development*. Obtenido de <https://www.wbcsd.org/>
- EcuRed. (2011). Obtenido de <https://www.ecured.cu/Tamiz>
- Educacion, M. d. (1999). *Norma Tecinca Colombiana - NTC 221 Densidad*. Obtenido de [https://www.mineduccion.gov.co/1621/articles-96894\\_Archivo\\_pdf.pdf](https://www.mineduccion.gov.co/1621/articles-96894_Archivo_pdf.pdf)
- Educacion, M. d. (1999). *Norma Tecnica Colombiana* . Obtenido de [https://www.mineduccion.gov.co/1621/articles-96894\\_Archivo\\_pdf.pdf](https://www.mineduccion.gov.co/1621/articles-96894_Archivo_pdf.pdf)
- Educacion, M. d. (1999). *Norma Tecnica Colombiana- NTC 110 consistencia normal* . Obtenido de [https://www.mineduccion.gov.co/1621/articles-96894\\_Archivo\\_pdf.pdf](https://www.mineduccion.gov.co/1621/articles-96894_Archivo_pdf.pdf)
- Educacion, M. d. (1999). *Norma Tecnica Colombiana- NTC 118 tiempos de fraguado*. Obtenido de [https://www.mineduccion.gov.co/1621/articles-96894\\_Archivo\\_pdf.pdf](https://www.mineduccion.gov.co/1621/articles-96894_Archivo_pdf.pdf)
- Educacion, M. d. (1999). *Norma Tecnica Colombiana- NTC33 FINURA*. Obtenido de [https://www.mineduccion.gov.co/1621/articles-96894\\_Archivo\\_pdf.pdf](https://www.mineduccion.gov.co/1621/articles-96894_Archivo_pdf.pdf)
- Educacion, M. d. (2006). *Norma Tecnica Colombiana - NTC 3493 CONTENIDO DE HUMEDAD*. Obtenido de [https://www.mineduccion.gov.co/1621/articles-96894\\_Archivo\\_pdf.pdf](https://www.mineduccion.gov.co/1621/articles-96894_Archivo_pdf.pdf)
- Educacion, M. d. (2006). *Norma Tecnica Colombiana - NTC 3493 INDICE DE ACTIVIDAD RESISTENTE* . Obtenido de [https://www.mineduccion.gov.co/1621/articles-96894\\_Archivo\\_pdf.pdf](https://www.mineduccion.gov.co/1621/articles-96894_Archivo_pdf.pdf)



- Educacion, M. d. (2006). *Norma Tecnica Colombiana - NTC 3493 REQUERIMIENTO DE AGUA*. Obtenido de [https://www.mineduccion.gov.co/1621/articles-96894\\_Archivo\\_pdf.pdf](https://www.mineduccion.gov.co/1621/articles-96894_Archivo_pdf.pdf)
- Educacion, M. d. (2006). *Norma tecnica colombiana- NTC 3493 DIÓXIDO DE SILICIO (SiO<sub>2</sub>) + OXIDO DE ALUMINIO (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)+OXIDO DE HIERRO (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>):* . Obtenido de [https://www.mineduccion.gov.co/1621/articles-96894\\_Archivo\\_pdf.pdf](https://www.mineduccion.gov.co/1621/articles-96894_Archivo_pdf.pdf)
- Educacion, M. d. (2006). *Norma Tecnica Colombiana- NTC 3493 TRIÓXIDO DE AZUFRE*.
- GONZALEZ, J. (12 de JULIO de 2013). Obtenido de [www.murosdecontencion2013.blogspot.com/.../historia-de-los-muros-de-contencion.html](http://www.murosdecontencion2013.blogspot.com/.../historia-de-los-muros-de-contencion.html)
- Guzmán, D. S. (2001). *tecnologia del concreto y del mortero* . SantaFe de Bogotá DC - Colombia : BHANDAR EDITORES LTDA.
- Hernández-Escobar, C. A. (2017). *Empleo de cenizas volantes para la elaboración de geopolímeros*.
- INTERNATIONAL, A. (23 de 07 de 1997). *ASTM INTERNATIONAL*. Obtenido de <https://www.astm.org/Standards/C270.htm>
- Lora, Á. V. (2016). *Departamento Ingenieria Quimica Ambiental* . Obtenido de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/90737/fichero/TRABAJO+FIN+DE+GRADO+%C3%81LVARO+VILLAMOR+LORA.pdf>
- Marisol Gordillo, E. D. (2013). *Optimización de la resistencia mecánica de cementos binarios MK/GBFS activados alcalinamente por Metodología de Superficie de Respuest*. Cali : eafit.
- MATERIALES DE LA CONSTRUCCION* . (01 de 2001). Obtenido de <http://materiales-de-construccion-ujcv.blogspot.com/2012/01/la-grava.html>
- McCORMAC, J. C., & BROWN, R. H. (2011). *DISEÑO DE CONCRETO REFORZADO*. ALFA OMEGA.
- nacional, b. d. (2014). *DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACION (DNP)*. Obtenido de [http://www.consultorsalud.com/sites/consultorsalud/files/bases\\_plan\\_nacional\\_de\\_desarrollo\\_2014-2018.pdf](http://www.consultorsalud.com/sites/consultorsalud/files/bases_plan_nacional_de_desarrollo_2014-2018.pdf)
- NUEVOS RECURSOS* . (2020). Obtenido de <http://nuevosrecursos.com/producto/maquina-universal-prensa-p-concreto/>

NUÑEZ, E. R. (2013). *COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y DURABILIDAD DE MORTEROS DE CENIZAS VOLANTES ACTIVADAS ALCALINAMENTE*. Bogota D.C.

Rangan, B. V. (2008). Obtenido de  
[file:///C:/Users/sala1/Downloads/20465\\_downloaded\\_stream\\_453.pdf](file:///C:/Users/sala1/Downloads/20465_downloaded_stream_453.pdf)

RODRÍGUEZ, C. P. (2012). *Obtención y caracterización de geopolímeros, sintetizados a partir de ceniza volante y piedra pómez, utilizados para el desarrollo y mejoramiento del concreto*. Mexico: Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal.

TORRES, A. G. (2017). *bdisgital.unal* . Obtenido de  
<http://bdigital.unal.edu.co/61987/1/79431541.2018.pdf>

VIAS, I. N. (2012). Obtenido de  
<file:///C:/Users/sala1/Downloads/SECCI%C3%93N%20100.pdf>